



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH KONCEPCE LETECKÉHO MOTORU NA CNG

CONCEPT OF THE AIRCRAFT CNG ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Šmerda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Svída, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Ondřej Šmerda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Svída, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh koncepce leteckého motoru na CNG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout koncepci hnacího ústrojí pro letadla spalujícího jako palivo stlačený zemní plyn (CNG).

Cíle diplomové práce:

Provést přehled konstrukčních řešení a odlišností pohonných jednotek spalujících jako palivo CNG ve srovnání s leteckým palivem AVGAS. Pro zvolený letecký spalovací motor provést návrh palivového systému a výběr jeho komponent. Sestavit matematický model CNG spalovacího motoru a porovnat jeho parametry s motorem na AVGAS. Zhodnotit použití CNG jako alternativního leteckého paliva.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

SKOTSKY, Alexander. Automotive engines: control, estimation, statistical detection. Berlin: Springer Verlag, 2009. 215 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá srovnáním a zhodnocením stlačeného zemního plynu jako paliva pro letecký pístový motor. Součástí je rešerše konvenčních paliv a odlišností palivových soustav na AVGAS a CNG. Následuje popis letadla a motoru ze kterého vychází matematický model. Poté je popsán výpočet výkonnostních parametrů a spotřeby při použití obou paliv a následně jsou výsledky porovnány. Na konci práce je popsán návrh palivové soustavy na CNG včetně výběru komponent.

KLÍČOVÁ SLOVA

letecký motor, alternativní paliva, CNG, AVGAS, palivová soustava, matematický model

ABSTRACT

Master's thesis deals with comparison and rating the compressed natural gas as an aircraft piston engine fuel. An information search of conventional fuels and differences of the fuel systems for AVGAS and CNG is included. Next part describes the aircraft and its engine on which is the mathematic model based. After that performance and consumption data are calculated for both fuels and the results are then compared. At the end of the thesis, a design of the CNG fuel system with components selection is described.

KEYWORDS

aircraft engine, alternative fuels, CNG, AVGAS, fuel system, mathematic model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMERDA, O. *Návrh koncepce leteckého motoru na CNG*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 62 s. Vedoucí diplomové práce David Svída.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Svídy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Ondřej Šmerda

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svým rodičům a manželce za podporu a trpělivost po celou dobu studia. Dále bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Davidu Svídovi, PhD. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Letadlové motory.....	11
1.1 Konvenční paliva pro letadlové motory.....	12
1.1.1 Letecký petrolej	12
1.1.2 Letecký benzín.....	12
1.2 Rozdíly mezi letadlovým a automobilním motorem	13
1.2.1 Spolehlivost leteckých motorů	14
1.2.2 Chlazení motoru	15
2 CNG (Compressed natural gas).....	17
2.1 Konstrukce motoru na CNG	17
2.1.1 Druhy palivových soustav motorů na CNG	18
2.1.2 Plnění vozidel stlačeným zemním plynem	20
2.2 Výhody a nevýhody provozu na CNG.....	21
2.2.1 Výhody	21
2.2.2 Nevýhody	22
3 Prototyp letadla na CNG	23
4 Letadlo a motor.....	24
4.1 Zvolené letadlo	24
4.2 Zvolený motor.....	25
4.2.1 Palivový systém.....	27
5 Matematický model	30
5.1 Vstupní parametry.....	31
5.1.1 Válcové jednotky	31
5.1.2 Sací a výfukové potrubí.....	31
5.2 Okrajové podmínky	32
5.2.1 Teplota vzduchu	33
5.2.2 Tlak vzduchu	34
5.2.3 Rozsah otáček	35
6 Provoz na AVGAS	36
7 Provoz na CNG.....	38
7.1 CNG se směšovačem	38
7.1.1 Zachování stávajících parametrů motoru	38
7.1.2 Zvýšení kompresního poměru	40
7.1.3 Zvýšení objemu motoru.....	42
7.1.4 Srovnání.....	44

7.2	Vefukování CNG do sacího potrubí	44
7.2.1	Nepřímý vstřík při zachování stávajících parametrů motoru	45
7.2.2	Nepřímý vstřík se změněným motorem	46
7.2.3	Srovnání.....	48
7.3	Provozní náklady	49
8	Návrh palivového systému na CNG	50
8.1	Palivová soustava se směšovačem	50
8.1.1	Plnicí ventil.....	50
8.1.2	Tlaková nádrž	51
8.1.3	Regulátor tlaku	53
8.1.4	Směšovač.....	53
8.2	Vefukování CNG do sacího potrubí	54
8.2.1	Regulátor tlaku	54
8.2.2	Vstříkovače.....	55
	Závěr.....	56
	Seznam použitých zkratek a symbolů	62

ÚVOD

Letecká doprava je stále populárnější způsob dopravy. Navzdory snižování emisí z automobilní dopravy, rychlý růst letecké dopravy přispívá k nárůstu celkového znečištění způsobeného letectvím. Přesto donedávna neexistovala žádná legislativa upravující povolené množství vypouštěných emisí z letadlových motorů.

Palivem pro letadla se spalovacím pístovým motorem je přednostně používán letecký benzín AVGAS. Poslední dobou se však alternativní paliva stávají velmi diskutovaným tématem téma nejen v souvislosti s leteckou dopravou, neboť je zapotřebí nahradit stávající ropná paliva. Motivací je snížení nejen vypouštěných emisí, ale i provozních nákladů. Vhodnou variantou se jeví zemní plyn, který je uchováván v plynné fázi ve stlačené formě. Zásoby zemního plynu jsou oproti ropě dvojnásobné a pro jeho použití ve spalovacím motoru jej není třeba upravovat složitými technologickými postupy. Nízká cena CNG umožňuje, aby létání malými letadly bylo ekonomicky výhodnější. Díky tomu by tyto letadla mohla být obzvláště vhodná pro letecké školy a výcvik nových pilotů. V případě postavení vlastní plničky CNG na své letiště by cena výcvikového kurzu mohla být několikanásobně levnější. Dalším benefitem spalování zemního plynu jsou nižší emise a menší opotřebení motoru.

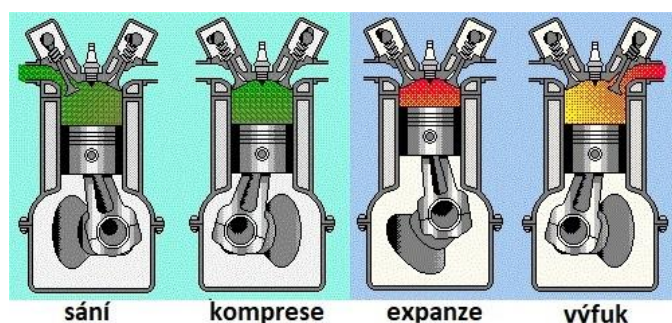
Cílem této práce je navrhnout koncepci hnacího ústrojí pro letadla spalující jako palivo stlačený zemní plyn a zhodnotit použití CNG jako alternativního leteckého paliva.

V diplomové práci je využit software Lotus Engineering Simulation k výpočtům výkonostních parametrů a spotřeby motoru při různých palivech.

1 LETADLOVÉ MOTORY

Pomineme-li elektromotory, využívají se k pohonu letadel tepelné motory s vnitřním spalováním. Tepelný motor přeměňuje část vnitřní energie paliva ve formě tepla na mechanickou práci za vzniku zůstatkového tepla. Letadla jsou poháněna zejména dvěma druhy tepelných motorů: pístovým a reakčním proudovým motorem.

Letadlové pístové motory obvykle pracují s Ottovým cyklem. Pístové spalovací motory mohou být dvoudobé a čtyřdobé, většina letadlových motorů je čtyřdobá. Energie paliva se převádí na mechanickou energii ve válcích, kde probíhá nejdříve sání směsi paliva a vzduchu, poté dochází ke kompresi, následuje zapálení směsi a expanze a nakonec dochází k výfuku spalín. Lineární pohyb válce je převeden na rotační pohyb hřídele. Hřídel pak přes reduktor, nebo přímo pohání vrtuli vyvozující tah.

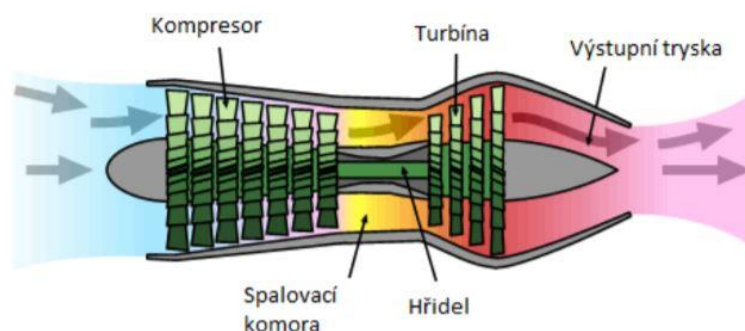


Obr. 1 Pracovní cyklus čtyřdobého zážehového motoru [4]

Pístové motory se liší uložením válců a klikové hřídele. Podle tohoto kritéria lze motory rozdělit na jednořadové, dvouřadové vidlicové, dvouřadové s protilehlými válci (ploché, boxery) a hvězdicové. Pístové motory pohánějící letadla se umísťují hned za vrtuli v trupu a jsou vhodné pro malé letové rychlosti. Využívají se tak především pro malá a sportovní letadla.

Pístové motory s Dieselvým cyklem byly použity na vzducholodích a ve 20. a 30. letech, ale i později proběhly jednotlivé pokusy použít je pro pohon letadel. V současné době existuje několik typů, certifikovaných pro použití ve sportovních letounech, jde však spíše o výjimky. Diesellové motory mají i přes svou nízkou spotřebu ve srovnání s klasickými benzínovými pístovými motory, špatný poměr výkon:hmotnost.

Reakční proudový motor pracuje na principu třetího Newtonova zákona o akci a reakci. Vzduch vstupuje do přední části motoru, kde je nasáván a stlačován kompresorem. Takto stlačený a zahřátý vzduch vstupuje do spalovací komory, kde je do něj vstříknuto palivo. Směs se zažehne a vzniklé horké plyny a tepelná energie roztáčí turbínu za spalovací komorou. Turbína je hřídelí spojena s kompresorem a tím jej pohání. Za turbínou je vysoký tlak a tepelná energie se mění na kinetickou - vzniká tah. Spaliny vycházející z motoru působí silou opačným směrem na motor, který tím ženou vpřed. Tyto motory bývají zavěšeny pod křídly, ale mohou být i na zádi letounu, případně jinde [1][3].



Obr. 2 Schéma reakčního proudového motoru [5]

1.1 KONVENČNÍ PALIVA PRO LETADLOVÉ MOTORY

U letadlových motorů máme palivo dvojího druhu. Rozlišujeme letecký petrolej a letecký benzín. Tato paliva se vyrábí destilací z ropy, kdy oddělujeme jednotlivé složky ropy, které se liší teplotou varu frakční destilací. Letecká paliva podléhají z hlediska kvality přísným kontrolám, neboť nelze připustit technickou závadu či poruchu letadla způsobenou nevyhovující kvalitou paliva [6].

1.1.1 LETECKÝ PETROLEJ

Letecký petrolej je bezbarvá kapalina, která bývá také někdy označována jako kerosin. Je to směs hydrogenačně upravených kapalných uhlovodíků s bodem varu od 160 °C do 300 °C. Přesné složení se liší ropou, ze které je petrolej vyrobený, proto nelze definovat jednoznačný poměr jednotlivých uhlovodíků. Pro komerční účely se nejčastěji využívá petrolej označovaný jako Jet-A a Jet-A1. Jde o specifický druh petroleje sloužící k pohonu lopatkových proudových motorů a také k pohonu turbovrtulových motorů. Letecký petrolej musí mít bod krystalizace minimálně -47 °C, aby nedošlo k zamrznutí paliva, neboť v letové hladině 10 000 m se teplota pohybuje kolem -50 °C. Lepší parametry v chladných podmínkách má petrolej označovaný Jet-B, které je založené na směsi nafty a kerosinu. Má nižší bod tuhnutí (až -60 °C), ale je nebezpečnější pro manipulaci [6].

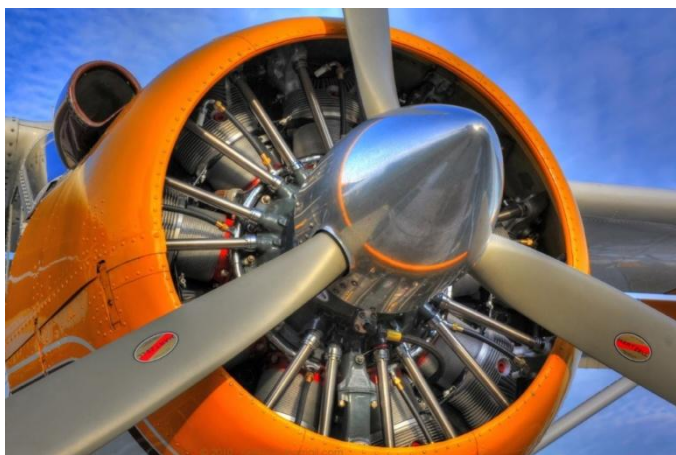
1.1.2 LETECKÝ BENZÍN

Požadavky na letecký benzín AVGAS se od toho určeného pro automobily liší jen málo. Vyrábí se smícháním rafinovaných ropných uhlovodíků, primárního benzínu nebo jejich směsí se syntetickými nebo aromatickými uhlovodíky, nebo ze směsí obou druhů. Přidává se do něj antidetonační přísada a modré barvivo. Jako antidetonační přísada se používá tetraetyl olova. Verze leteckého benzínu bez antidetonační přísady disponuje oktanovým číslem určeným motorovou metodou kolem 80, kdežto olovnaté typy mají oktanové číslo motorovou metodou nad 100 jednotek. V posledních letech se zavádí další typ leteckého benzínu s oktanovým číslem nad 91. Letecké benzíny mají oproti automobilovým nižší těkavost, vyšší začátek destilace a nižší konec. I tak se jedná o vysoce těkavou a extrémně hořlavou tekutinu s nízkým bodem vzplanutí. Obsah olova v olovnatých leteckých benzínech

se v minulosti pohyboval až na úrovni 2,11 g/kg. V současné době se však již používají environmentálně přijatelnější typy olovnatého leteckého benzínu označované jako 100 LL s obsahem olova max. 0,75 g olova /kg benzínu. Pro srovnání v automobilovém benzínu je maximálně 5 mg /kg benzínu [6][7].

1.2 ROZDÍLY MEZI LETADLOVÝM A AUTOMOBILNÍM MOTOREM

Pístové spalovací motory užívané v letadlech a v automobilech mají několik podobností. V obou případech jde většinou o čtyřdobý zážehový motor se čtyřmi nebo šesti válci. Zatímco v automobilech jsou válce uspořádány v řadě, v případě šesti válců jde o motory vidlicové do V, v letadlech jsou nejčastěji motory hvězdicové nebo motory s protilehlými válci typu boxer, neboť větší šířka motoru umožňuje lepší podmínky pro vzduchové chlazení válců [9].



Obr. 3 Hvězdicové uspořádání leteckého motoru [8]

Pístové spalovací motory pro letadla jsou navrženy s přihlédnutím k tomu, že motor pracuje ve stálých otáčkách, které se za letu téměř nemění. Nejvyššího výkonu dosahují kolem 2900 min^{-1} , zatímco motor konstruovaný do automobilu musí pracovat v širokém spektru otáček a nejvyššího výkonu dosahuje kolem 5000 min^{-1} . Letadlové motory jsou navrženy pro provoz při menších otáčkách, neboť vrtule při vyšších otáčkách vykazuje menší účinnost a také je snaha zabránit zvukovým vibracím, ke kterým by mohlo dojít, pokud by se konec vrtule otáčel rychleji, než je rychlost zvuku. Někdy se setkáme i s letadlovými motory, které jsou navrženy pro vyšší otáčky. Takové motory disponují planetovou převodovkou, aby špičky listů vrtule nedosahovaly rychlosti zvuku. Automobilový motor po většinu svého života pracuje pod 20 % svého maximálního výkonu a bude se nejčastěji pohybovat v rozmezí otáček $1500\text{--}3000 \text{ min}^{-1}$ díky převodům. Naproti tomu motor v letadlech je konstruován tak, aby byl schopen vydávat více jak 65 % výkonu téměř pořád, při startu by dokonce měl být motor schopen po několik minut pracovat na nejvyšší výkon. Tím se letadlové motory podobají více motorům pro stacionární použití. Automobilový motor pro závodní aplikace je sice navržen tak, aby byl schopen provozu při maximálním výkonu, takové motory však nemají dlouhou životnost.

Aby letecké motory dosáhly požadovaného výkonu při nižších otáčkách, mají většinou větší průměr vrtání, aby větší plocha pístu zajistila dostatečný tlak a krouticí moment při nižších otáčkách.

Vrtule zajišťuje tah, který přenáší přes motor na celé letadlo. Letadlové motory proto disponují robustními axiálními ložisky, aby vydržely tah, gyroskopické zatížení vrtule a torzní vibrace. Automobilové motory nejsou navrženy tak, aby mohly přenášet nějaká zatížení tahající za klikovou hřídel. Potřebují jen přenést točivý moment přes spojku nebo měnič točivého momentu a i při nevhodném zacházení zabráňují nadměrnému opotřebení klikové hřídele velký setrvačnick a flexibilita hnacího ústrojí (např. prokluz kol).

K vyrovnaní chodu motoru a kumulaci setrvačné energie se u letadla částečně postará vrtule, takže není zapotřebí těžký velký setrvačnick [9][10].

1.2.1 SPOLEHLIVOST LETECKÝCH MOTORŮ

U leteckých motorů se klade větší důraz na spolehlivost, neboť selhání či porucha motoru v letadle má dalekosáhlejší následky než porucha u motoru automobilového. Důležitější než rychlá odezva páky akcelérátoru je právě spolehlivá a dlouhá životnost motoru. Proto jsou u letadel předepsány prohlídky a výměny dílů, které mohou podléhat únavě materiálu na základě odlétaných hodin stroje. Letecký motor má zdvojenou zapalovací soustavu, dvě dynama a dvě zapalovací svíčky na válec pro případ poruchy jednoho prvku soustavy. Dvě zapalovací svíčky také napomáhají rychlejšímu šíření zažehnutí směsi v širším válci. Jedná se o samostatné zapalovací systémy, které nevyžadují žádnou baterii pro napájení, to znamená, že nedojde k výpadku motoru ani po odpojení baterie a alternátoru.



Obr. 4 Zdvojená zapalovací soustava leteckého motoru [15]

U leteckého motoru je též dvojnásobný objem motorového oleje, než je nutné pro bezproblémový provoz. Letadlový motor musí být provozuschopný v širokém spektru provozních podmínek vzhledem k nadmořské výšce. S nadmořskou výškou se mění tlak a teplota vzduchu. Tyto veličiny mají zásadní vliv na výkon a tepelný management motoru. Letadlové motory proto disponují buď karburátorem, který kompenzuje výšku, nebo mechanickým vstřikem paliva a manuálním či automatickým nastavením bohatosti směsi. Aby se předešlo zamrznutí karburátoru ve velkých nadmořských výškách, ohřívá se vzduch přiváděný do karburátoru výfukovými plyny. Obecně se dá říci, že u leteckých motorů se

požaduje větší kvalita důležitých komponent motoru. Písty nejsou odlévané, ale kované a blok a hlava jsou vyráběny z materiálů s velkým obsahem niklu.

Pokud letecký pístový motor používá plnění válců směsí pod tlakem, důvodem není zvýšení výkonu motoru s přirozeným sáním, ale zachování maximálního výkonu motoru i ve vysokých nadmořských výškách. Co se týče výfukového potrubí, u letadel se nepoužívá katalyzátor a ve většině případů ani tlumič výfuku [9][10].

1.2.2 CHLAZENÍ MOTORU

Při pracovním oběhu spalovacího motoru jsou v pracovním prostoru válce teploty krátkodobě přesahující 2000 °C. Část tepla odchází s výfukovými plyny, zčásti je motor chlazen motorovým olejem, ale velká část tepla musí být odvedena z motoru pryč pomocí chladicí soustavy. Účelem chladicí soustavy je snížit a kontrolovat pracovní teplotu tak, aby byla pod úrovní poškození kovových částí, a tak nedošlo k roztavení nebo ztrátě pevnosti nebo při velké teplené roztažnosti ke zvýšení tření a mechanickému namáhání. Neméně důležitým úkolem soustavy je zároveň snížit teplotu pod úroveň tepelné degradace motorového oleje. Ani příliš nízká teplota motoru není žádoucí, neboť by se v tomto případě odvádělo příliš mnoho tepla z motoru pryč, aniž by vykonalo práci. Proto má chladicí systém také za úkol rychlé dosažení pracovní teploty motoru a poté její udržování na téměř konstantní hodnotě.

U spalovacích motorů jsou dvě základní hlediska přenosu tepla. Prvním je přenos tepla ze spalovací komory do částí, které ohraničují spalovací komoru, a druhým hlediskem je přenos tepla z těchto částí do chladicího média. Návrh a provedení chladicího systému jsou dány funkcí motoru, jeho zatížením a rychlostí a provozními podmínkami, ve kterých bude motor pracovat. Jako chladicí médium se u spalovacích motorů využívá vzduch nebo kapalina. Některé systémy mohou být doplněny ještě o chlazení olejem, které ale samostatně nemá dostatečný chladicí účinek.

V případě motoru spalujícího jako palivo benzín je díky chlazení spalovací komory zajištěna ochrana proti samovolnému vznícení a detonačnímu hoření. Motor spalující CNG je však díky svému vysokému oktanovému číslu na detonační hoření odolnější [1].

Téměř všechny letecké motory jsou chlazeny vzduchem. Aby chlazení bylo dostatečné, jsou motory opatřeny žebrováním, které zvětší povrch styku se vzduchem tak, aby byl zajištěn větší odvod tepla do okolí [13].



Obr. 5 Vzduchem chlazený letecký motor s žebrováním [14]

Letecké motory využívají náporové vzduchové chlazení, kde výměna chladicího vzduchu je dána pohybem letadla, při kterém kolem chlazených míst prochází vzduch. Aby byl zajištěn dostatečný proud vzduchu ke každému válci a ty byly chlazeny rovnoměrně, využívají se deflektory a tvarované kryty motorů pro nasměrování proudu vzduchu. Mezi nevýhody systému chlazení vzduchem patří zvýšení aerodynamického odporu a omezená možnost regulace teploty motoru. Výhodou je oproti kapalinou chlazené soustavě menší hmotnost a jednoduchost. Díky jednoduché konstrukci a menšímu množství součástí je chlazení vzduchem spolehlivější [12][13].

Chladicí soustava využívající kapalinu jako chladicí médium se vyskytovala u řadových výkonných motorů, kde není možné zajistit dostatečný proud studeného vzduchu pro všechny válce rovnoměrně. Čerpadlo žene chladicí kapalinu přes válce do výměníku, kde kapalina odevzdá teplo odebrané ze stěny válců a hlavy motoru okolnímu vzduchu. Kapalina je v systému tlakována čerpadlem, aby se zvýšil její bod varu, a tím i teplotní rozdíl mezi kapalinou a vzduchem. Výhodou tohoto systému je nižší aerodynamický odpor, regulace teploty a vyšší odolnost motoru proti teplotním šokům. Mezi nevýhody řadíme vyšší hmotnost soustavy a složitost, která snižuje spolehlivost [1][11].

2 CNG (COMPRESSED NATURAL GAS)

Zemní plyn je hořlavý výbušný plyn bez barvy, zápachu a bez chuti. Je lehčí než vzduch a je to zároveň nejčistší fosilní palivo. Jako palivo pro spalovací motory se používá zemní plyn v plynné fázi. Zásadní výhodou zemního plynu je jeho složení, ve kterém je převážně zastoupen metan, tedy nejjednodušší uhlovodík s jedním atomem uhlíku v molekule. Už samotné plynné skupenství paliva zaručuje lepší mísení se vzduchem, a tím dokonalejší spalování. Zemní plyn se přímo těží, je vedlejším produktem těžby ropy a není třeba jej vyrábět složitými technologickými procesy. Zásoba zemního plynu je asi dvojnásobná oproti zásobám ropy a je rovnoměrněji rozprostřena po světě, což má nesporné ekonomické a politické výhody.

Zemní plyn jako palivo pro spalovací motor se používá ve dvou formách: CNG (Compressed Natural Gas) a LNG (Liquefied Natural Gas). CNG je stlačený zemní plyn v plynné fázi při tlaku 20 MPa LNG zkapalněný zemní plyn při teplotě $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16][17].

V následující tabulce jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti stlačeného zemního plynu.

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti CNG

Výhřevnost [MJ/m^3]	34,10
Hustota [kg/m^3]	0,678
Oktanové číslo	128
Výparné teplo [kJ/kg]	555
Bod varu [$^{\circ}\text{C}$]	-162
Teplota vznícení [$^{\circ}\text{C}$]	537
Stechiometrický poměr vzduchu k palivu [m^3]	9,51

2.1 KONSTRUKCE MOTORU NA CNG

Zemní plyn je těkavý, lehčí než vzduch a velice rychle se rozptýluje do ovzduší. Při náhodném manipulačním úniku (např. během tankování) se rozptýlí během několika sekund na zcela neškodnou, nehořlavou a netřaskavou směs.

Způsob uchovávání vyžaduje silnostěnné tlakové nádoby, neboť zemní plyn je uchováván v plynné fázi při tlaku 20 - 22 MPa. Nádrže jsou z bezpečnostních důvodů testovány na tlak 30 MPa a proti roztržení musí být odolné až do tlaku 45 MPa.

Plnění nádrží zajišťuje plnicí ventil, který slouží k propojení plnicí stanice s tlakovou nádrží. Pomocí rychloupínacího systému se plnicí pistole na hadici výdejního stojanu připojí na plnicí koncovku. Při plnění nedochází ke ztrátám paliva, ke kterým běžně dochází odparem při tankování kapalných paliv. U zemního plynu také nehrozí kontaminace půdy a spodních vod při havárii na plnicím systému, neboť zemní plyn je lehčí než vzduch a přirozeně odvětrává. U CNG systému je vyloučeno zcizení pohonných hmot. Plnicí ventil je vybaven kontrolním jednocestným ventilem, který zabraňuje zpětnému proudění plynu z nádrže [18][19].

Tlakové nádrže na CNG se vyrábí z vysoce kvalitního ocelového plechu o min. tloušťce 8 mm nebo z lehkých hliníkových či kompozitních materiálů (např. kevlaru). Kompozitní

materiály jsou stejně pevné jako ocel a váží až 3krát méně. Např. ocelová válcová nádrž o objemu 70 l (360 x 900 mm) váží 70 kg a pojme 14 m³ CNG (cca 10 kg CNG). Velkou nevýhodou pohonu dopravního prostředku stlačeným zemním plynem je tak v hmotnosti nádrže, kdy je u konvenční ocelové nádrže dosaženo měrné hmotnosti 1 kg/l.



Obr. 6 Tlaková nádrž na CNG [23]

Nádrže jsou vybaveny bezpečnostním ventilem, který je zároveň i provozním ventilem. V případě náhlého poklesu tlaku v soustavě, např. při přerušení vysokotlakého potrubí, přeruší ventil dodávku plynu do systému a v případě přetlaku vypustí plyn do okolí.

Pro případ požáru jsou nádrže pojištěny tavnými pojistkami, které plyn pomalu vypustí takovým způsobem, aby nedošlo k výbuchu. Životnost těchto nádrží je omezená, obvykle se stanovuje 20 let od data výroby. Nejčastěji se vyskytují nádrže válcové, aby byl tlak uvnitř nádoby rovnoměrně rozmístěn. Palivové nádrže jsou vystaveny povětrnostním, chemickým a provozním vlivům, které mohou poškodit strukturu a pevnost nádrže. Proto je nutné podrobit nádrže každé 3 roky inspekci.

Kromě tlakové nádrže musí mít systém regulátor tlaku plynu, který redukuje tlak plynu přicházejícího z nádrže na požadovaný pracovní tlak nízkotlaké části soustavy. Redukce tlaku plynu probíhá ve dvou stupních z důvodu zajištění konstantního tlaku za regulátorem i při změně tlaku v palivové nádrži. Jelikož při expanzi plynu dochází k ochlazení, je nutné zajistit, aby nedošlo k zamrznutí regulátoru. Z tohoto důvodu je regulátor napojen na chladicí okruh automobilu, ze kterého odebírá teplo. Mezi regulátorem a nádrží může být umístěn vysokotlaký filtr, který čistí palivo od vlhkosti a nečistot [20][19].

Další komponenty systému se dělí podle způsobu přívodu paliva do spalovacího prostoru.

2.1.1 DRUHY PALIVOVÝCH SOUSTAV MOTORŮ NA CNG

POUŽITÍ SMĚŠOVAČE

Nejstarším způsobem je soustava se směšovačem plynu. Směšovač si lze představit jako jednoduchý karburátor umístěný v sacím potrubí, jehož úkolem je co nejlépe promísnit plyn se vzduchem. Jde o většinou hliníkový odlitek s otvorem uprostřed a malými otvory po jeho obvodu, kterými je přiváděn plyn. Důležitý je také tvar směšovače, který je tvarován jako tryska. Ve střední části směšovače se zmenšuje jeho průřez, a tím se zvyšuje rychlost průtoku vzduchu. Zároveň tak v tomto místě poklesne tlak, a proto dochází k efektivnímu nasátí

a promísení plynu se vzduchem. Výhodou tohoto systému je konstrukční jednoduchost a cena, nevýhodou je vyšší spotřeba paliva a horší emise škodlivých látek v porovnání s modernějšími systémy [21].



Obr. 7 Směšovač CNG [24]

POUŽITÍ VSTŘIKOVAČŮ

Nejpoužívanějším způsobem přívodu paliva do válce je vefouknutí plynu do sacího potrubí. V těchto systémech je směšovač nahrazen vefukovacím ventilem v sacím potrubí, který reguluje množství vefukovaného plynu dobou otevření. Ventil je řízen řídicí jednotkou, která určuje množství plynu na základě signálu od lambda sondy analyzující složení výfukových plynů. Díky tomu je možné řídit složení zápalné směsi, a tak ovlivnit emise a spotřebu plynu. Je zde ale nebezpečí zpětného zášlehu, kdy by došlo k samovznícení směsi v sacím potrubí. Hlavní nevýhodou je však nerovnoměrné rozdělení směsi mezi jednotlivé válce v případě jednoho společného vefukovacího ventilu. Proto se častěji používá vícebodové vstřikování se samostatným ventilem pro každý válec. Tím je možné zajistit optimální směs v každém válci, a tak ještě více snížit emise a spotřebu paliva.



Obr. 8 Vstřikovače CNG [25]

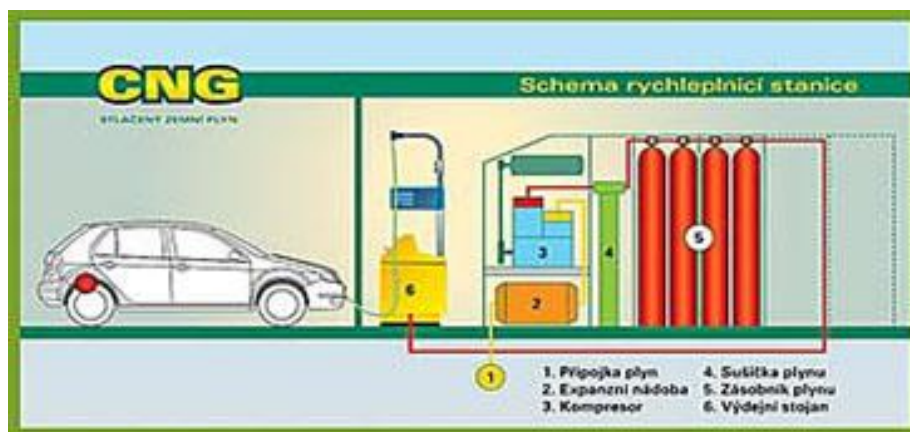
Posledním způsobem dopravy plynu do válce je přímé vefukování plynu do spalovacího prostoru. U zážehových motorů není tento způsob rozšířen kvůli své konstrukční složitosti a technologické náročnosti, ale zjistilo se, že takto navržený systém je schopen spalovat CNG ve vznětovém motoru. Teplota vznícení CNG je cca 580 °C a teplota vznícení nafty je 120 °C, pouhým stlačením plynu by tudíž ke vznícení nedošlo. Proto je nutné do spalovacího prostoru

umístit keramickou destičku, která udržuje ve spalovacím prostoru teplotu 1200-1300 °C, aby došlo ke vznícení paliva. Systém musí být vybaven kompresorem, aby mohl být překonán tlak ve spalovacím prostoru. Zemní plyn je celkem dobře stlačitelný, v zásobníku paliva tedy nastává problém s regulací tlaku a díky tomu není možné měnit vefukovací tlak v průběhu spalovacího cyklu. Proto se používají vefukovací ventily s proměnným zdvihem, kdy množství vefukovaného paliva je řízeno zdvihem ventilu. Díky tomu můžeme přesně řídit množství plynu a tím snížit emise a spotřebu paliva [21].

2.1.2 PLNĚNÍ VOZIDEL STLAČENÝM ZEMNÍM PLYNEM

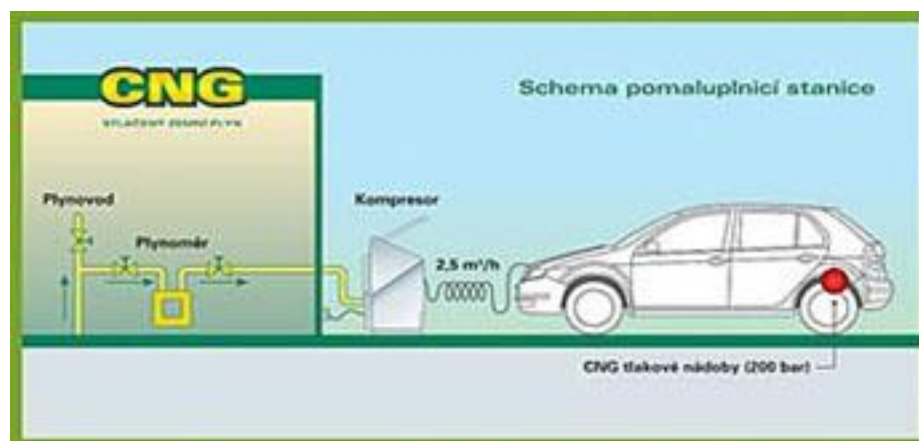
Zemní plyn je do České republiky dopravován dálkovými plynovody především z Ruské federace (75 % dováženého plynu) a také z Norska. Tlak v potrubí je však nižší než tlak potřebný pro skladování v nádržích. Proto jsou pro naplnění nádrže potřebné ještě kompresní stanice. Využit lze rychloplnicích stanic, kde se rychlost čerpání paliva podobá klasickým kapalným palivům, nebo pomalejší tzv. domácí plničky.

Rychloplnicí stanice jsou součástí některých vybraných větších čerpacích stanic, vzhledem k ostatním palivům však jde o nedostatečný počet a hustotu. Zemní plyn je odebírán z plynové přípojky a dále je stlačován více stupňovým kompresorem až na tlak 30 MPa. Natlakovaný plyn je uchováván v zásobnících. Před zásobníky je umístěna sušička plynu, kde se plyn zbavuje kondenzátu či případných nečistot. Výdejní stojany jsou většinou samoobslužné a jsou vybaveny hmotnostním měřením průtoku plynu, teploty a tlaku plynu a elektronické řízení zajišťuje plnění nádrže ve vozidle na stanovený provozní tlak 20-22 MPa.



Obr. 9 Schéma rychloplnicí stanice CNG [21]

Plnění vozidla zemním plynem u pomalu plnicí stanice se realizuje přímo pomocí speciálního kompresoru, který je připojen na plynovodní přípojku. Doba plnění tímto způsobem trvá v závislosti na velikosti nádrže 5 - 8 hodin, je tedy vhodné pro vozidla, která parkují na jednom místě a nejsou v nepřetržitém provozu [21].



Obr. 10 Schéma pomaluplnicí stanice CNG [21]

2.2 VÝHODY A NEVÝHODY PROVOZU NA CNG

2.2.1 VÝHODY

Zemní plyn, stejně jako ostatní plynná paliva, je z hlediska přípravy směsi výhodnější, než paliva kapalná. Vzhledem ke shodnému skupenství se plynné palivo se vzduchem lépe promíchá a vzniká homogenní směs. Lze snáze dodržet směšovací poměr, a tím i řídit množství emisí škodlivých látek. Další provozní výhodou je absence karbonových usazenin. Technologie pohonu a skladování CNG je velmi propracovaná, bezpečná, ekologická a propagovaná. Spotřeba klesá při spalování chudých směsí a výkon se zvyšuje s vyšším kompresním poměrem.

Jak je uvedeno výše, je při spalování zemního plynu díky jeho chemickému složení emitováno menší množství škodlivých látek a díky nižší hustotě zemního plynu vůči okolnímu vzduchu nemůže dojít ke kontaminaci půdy. Při úniku se plyn rozptýlí do okolí, zatímco tekutá paliva zůstávají na místě a mohou způsobit požár. Při tankování nevznikají žádné ztráty paliva jako např. při odpařování nafty.

Výhodou je také cena, neboť CNG je zatíženo jen minimální spotřební daní a motorová vozidla na CNG jsou osvobozena od silniční daně.

Tak jako u jiných plynných paliv, stanou se provozní vlastnosti motoru při použití CNG jako paliva pro spalovací pístový motor uživatelsky příjemnější. Motor má tišší a rovnoměrnější chod (menší hluk uvnitř i vně vozidla) a menší vibrace. CNG automobily vykazují snížení hladiny zvuku o 10 až 15 dB. Zemní plyn nijak nereaguje ani se nerozpouští v motorovém oleji ani netvoří nespálené částice, takže motorový olej se déle udrží čistší a nezředěný, má tedy prodloužený interval výměny [20][21].

2.2.2 NEVÝHODY

Nevýhoda zemního plynu je jeho nízká výhřevnost, která vede ke snížení výkonu motoru a také snížení objemové účinnosti motoru v důsledku snížení objemu nasávaného vzduchu. Tato nevýhoda však platí pro všechna plynná paliva. Další nevýhodou je velká hmotnost tlakových nádob.

Teoretickou nevýhodou je větší opotřebení motoru v důsledku nárůstu spalovacích teplot a tlaků. To se negativně projevuje zejména ve větším opotřebení výfukových ventilů a ventilových sedel. Tomu se zamezí například přístřikem benzínu, kdy se v softwaru řídicí jednotky nastaví procento přístřiku. Druhým způsobem ochrany ventilů a ventilových sedel je přidání aditiva na bázi draslíku, které u vozů na plyn nahrazuje olovo [20][21].

3 PROTOTYP LETADLA NA CNG

Prvním letadlem užívajícím jako palivo stlačený zemní plyn je malé letadlo vyrobené americkou firmou Aviat AC-1 Husky. Letadlo bylo představeno na letecké výstavě v USA v roce 2013 a otevřelo tak cestu k levnější a čistší letadlové dopravě. Jedná se o letadlo s pístovým spalovacím motorem, který je uzpůsoben pro spalování klasického leteckého benzínu i zemního plynu.



Obr. 11 Aviat AC-1 Husky na zemní plyn [26]

Letoun je poháněn čtyřválcovým motorem Lycoming o výkonu 150 kW. Při přestavbě na spalování zemního plynu prošel motor úpravou, při které byly použity nové písty za účelem zvýšení komprese. Kompresní poměr stoupl z 8,5:1 na 10,0:1, aby mohl být plně využit potenciál zemního plynu. Kromě standardních palivových nádrží na AVGAS s kapacitou 190 litrů je pod trupem umístěna tlaková nádrž z kompozitních materiálů s kapacitou 32 m³ CNG. Z důvodu umístění nádrže musel letoun dostat prodloužený podvozek. S plnými nádržemi je letoun schopen až 7 hodin letu při 65 % výkonu motoru. Mezi výhody použití CNG řadí výrobce nižší emise, větší životnost motorového oleje a nižší provozní náklady.

Letoun se především využívá pro školení pilotů a díky spalování zemního plynu došlo ke snížení provozních nákladů až o 60 dolarů na hodinu. Výrobce odhaduje, že přestavba letounu zvýšila cenu letadla o 15 tisíc dolarů oproti letadlu poháněnému pouze leteckým benzinem [26].

4 LETADLO A MOTOR

Na základě konzultací s vedoucím práce jsem vybral letadlo s motorem, které použiji jako předlohu pro své výpočty a simulace. Předmětem mého zkoumání bude uzpůsobení stávajícího palivového systému a motoru pro spalování stlačeného zemního plynu. Zaměřím se především na výkonnostní parametry a spotřebu.

4.1 ZVOLENÉ LETADLO

Pro svou studii jsem zvolil letoun Tecnam P2002 Sierra.



Obr. 12 Tecnam P2002 Sierra [27]

Jedná se o dvoumístný dolnoplošník, který spadá do kategorie malých sportovních letadel a je poháněn motorem Rotax 912 ULS o výkonu 69 kW. Motor bude podrobněji popsán v následující kapitole. U těchto typů letadel je omezena maximální vzletová hmotnost a jsou určeny maximálně pro 2 osoby. Definice a požadavky na vlastnosti malých sportovních letadel se v různých zemích liší.

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry letadla.

Tabulka 2 Základní parametry letadla Tecnam P2002 Sierra

Rozměry	
Počet míst	2
Rozpětí	8,56 m
Délka	6,74 m
Výška	2,4 m
Průměr vrtule	1,6 m
Plocha křídél	11,5 m ²

Výkony	
Pádová rychlost	40 uzlů (74 km/h)
Nepřekročitelná rychlost	157 uzlů (290 km/h)
Maximální cestovní rychlost	120 uzlů (222 km/h)
Stoupavost	4,7 m/s
Dolet	1188 km
Dostup	4267 m
Hmotnosti	
Prázdná hmotnost	331 kg
Maximální vzletová hmotnost	600 kg
Užitečné zatížení	250 kg
Spotřeba	17 l/h
Objem nádrže	2 x 55 l
Cena nového modelu v základní výbavě	56 860 €

Italská firma Tecnam byla založena roku 1986 a zabývá se především výrobou dílů do letadel pro jiné výrobce, ale má také nabídku vlastních lehkých letadel. Letoun s označením P2002 Sierra konstrukčně vychází z letounu P-96 GOLF se stejným motorem. Sierra má celokovový hliníkový trup a nízko položená křídla. Výhodou dolnoplošného uspořádání je možnost nižšího a lehčího podvozku a také snazší nastupování a vystupování z letounu. Navíc při kroužení nezakrývá křídlo prostor, kolem kterého kroužíme, a umožňuje nám tak lepší výhled než při hornoplošném uspořádání. Nevýhodou tohoto uspořádání jsou horší aerodynamické vlastnosti a stabilita, neboť těžiště letounu je výše, než aerodynamický střed letounu, což je nevýhodné pro podélnou i příčnou stabilitu. V křídlech z lehké slitiny jsou umístěny dvě nádrže na palivo o celkové kapacitě 110 litrů. Kvůli zvýšení pasivní bezpečnosti jsou křídla od kabiny odděleny. Střecha kabiny je posuvná a umožňuje otevření i během letu. Navíc díky tomu, že je prosklená, umožňuje perfektní 360stupňový výhled a je pevnostně testována kvůli bezpečnosti při převrácení letounu [28].

Výroba letadla probíhá v souladu s mezinárodními normami civilního letectví a letoun je výrobcem certifikován v kategorii VLA - velmi lehká letadla. Letadlo je oblíbeným strojem pro svou kombinaci aerodynamických vlastností, výkonu a velmi nízkým provozním nákladům především u leteckých škol.

4.2 ZVOLENÝ MOTOR

Zvolený letoun je poháněn pístovým spalovacím motorem ROTAX 912 ULS. Jedná se o čtyřtakový čtyřválcový motor s protilehlými válci typu boxer.



Obr. 13 Rotax 912 ULS [29]

Motor konstrukčně vychází z verze 912 A, která byla vyvinuta na počátku 90. let rakouskou firmou ROTAX. Motor má kapalinou chlazené hlavy válců a vzduchem chlazené válce. O tvorbu zápalné směsi se starají dva rovnotlaké karburátory. Palivové čerpadlo je mechanické membránové a je zde použito zdvojené bezkontaktní zapalování s řídicí jednotkou DUCATI. Vrtule je poháněna přes reduktor s poměrem $i = 2,43$ s prokluzovou spojkou. Motor je především konstruovaný pro spalování leteckého benzínu AVGAS 100LL, ale je certifikovaný i pro spalování klasického automobilového bezolovnatého benzínu. Má sice kratší servisní interval než konkurenční letecké motory (2000 hod.), zato vykazuje lepší účinnost a nižší spotřebu paliva [29].

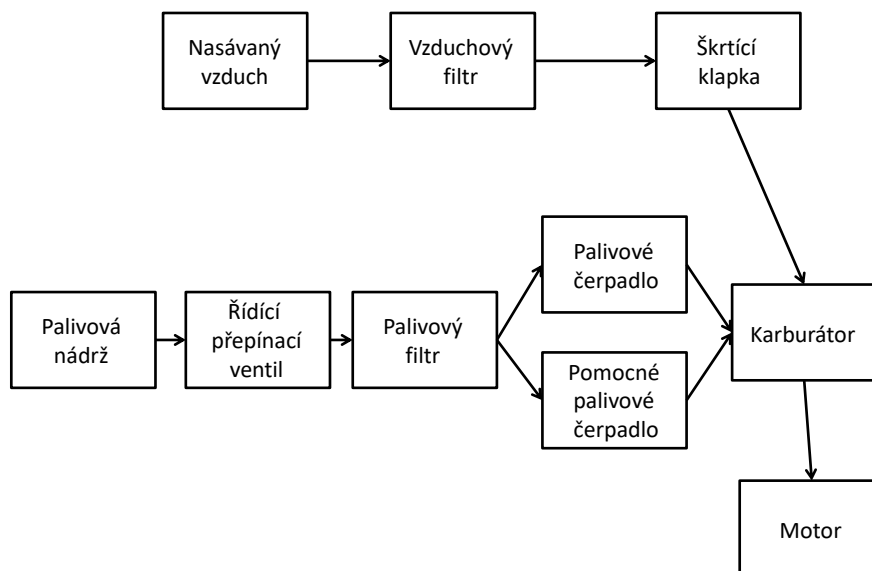
V následující tabulce jsou uvedena základní technická data, která mi sloužila jako vstupní údaje pro tvorbu mého matematického modelu.

Tabulka 3 Základní parametry motoru Rotax 912 ULS

Vrtání	84 mm
Zdvih	61 mm
Zdvihový objem	1352 cm ³
Kompresní poměr	10,5:1
Výkon	69,0 kW (95,0 k) při 5500 min ⁻¹
Krouticí moment	128 Nm při 5100 min ⁻¹
Váha motoru s reduktorem	56,6 kg

4.2.1 PALIVOVÝ SYSTÉM

Schéma stávajícího palivového systému je na následujícím obrázku.



Obr. 14 Schéma palivového systému na letecký benzín

Palivové nádrže integrované v náběžné hraně křídel jsou součástí konstrukce letadla a kvůli bezpečnosti jsou od trupu odděleny. Nádrže musí být odvětrávány, aby byl umožněn vstup vzduchu místo spáleného paliva, jinak by byla nádrž v podtlaku a motoru by nebylo dodáváno potřebné množství paliva. Odvětrání navíc umožňuje přizpůsobit se změnám atmosférického tlaku a teploty. Z nádrže je palivo vedeno potrubím skrze ostatní komponenty palivového systému až k motoru.

Za nádržemi je v palivovém potrubí umístěn řídicí přepínací ventil paliva, který umožňuje pilotovi zvolit, z které nádrže chce odebírat palivo. Některá letadla tento ventil nemají a palivo je dodáváno z obou nádrží současně. Avšak většina letadel včetně letounu P2002 Sierra tímto ventilem disponuje, aby měl pilot možnost vyrovnávat zatížení paliva, a tak snížit příčný výkyv letadla. Tímto ventilem lze také přívod paliva k motoru zcela uzavřít, a to například v případě požáru motoru [28] [31].



Obr. 15 Řídící přepínací ventil paliva [30]

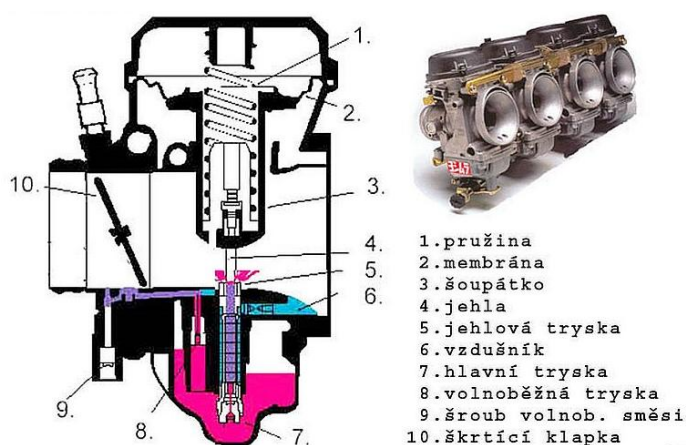
Za přepínacím ventilem v nejnižším bodě palivového systému je umístěn palivový filtr, který lze otevřít a vypustit z palivového systému nečistoty hustší než benzín, především vodu a usazeniny. Další vypouštěcí ventily jsou v každé nádrži (často více než jeden na nádrž) také u čerpadla. Součástí každé předletové kontroly je právě kontrola množství vody a usazenin v palivu. Vypouštěcí ventil nádrží může pilot otevřít také za letu, když v případě nouze potřebuje snížit hmotnost letadla například při nouzovém přistání [28] [31].



Obr. 16 Předletová kontrola usazenin a nečistot v palivu [32]

Další částí palivového systému jsou dvě paralelně zapojená čerpadla. Jedno čerpadlo je poháněno motorem a druhé je elektrické. Čerpadlo poháněné motorem je primární, elektrické čerpadlo dodává palivo v případě jeho poruchy. Elektrické čerpadlo také dodává palivo při startu a zabráňuje ucpání palivového potrubí benzínovými parami během letu ve vysoké nadmořské výšce. Důvodem pro redundantní použití dvou čerpadel je zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti

Poslední částí palivového systému jsou karburátory, ve kterých se palivo mísí se vzduchem, aby vznikla zápalná směs, kterou bude možno ve válci zažehnout. Motor Rotax 912 ULS využívá dvou rovnotlakých karburátorů, které mají měnitelný průřez difuzoru, čímž seudržuje konstantní podtlak [28] [31].



Obr. 17 Schéma rovnotlakého karburátoru [33]

U tohoto typu karburátoru je šoupátko ovládáno pomocí podtlaku v sacím potrubí. Podtlak se dostane nad membránu, která ovládá šoupátko, a pod ní je přiveden tlak atmosférický. Tento tlakový poměr působí na šoupátko, které je ještě navíc doplněno pružinou. Pružina nefunguje jako vratná pružina, nýbrž uměle zvětšuje tíhu šoupátka, aby bylo při volnoběhu v nejnižší poloze. Šoupátko je tedy ovládáno motorem a nikoli naopak. S šoupátkem se pohybuje i na něm upevněná jehla. Motor se tedy neustále snaží vyrovnávat rozdíl tlaků před a za šoupátkem, čímž si vynucuje konstantní průtok, resp. tlak palivové směsi [33].

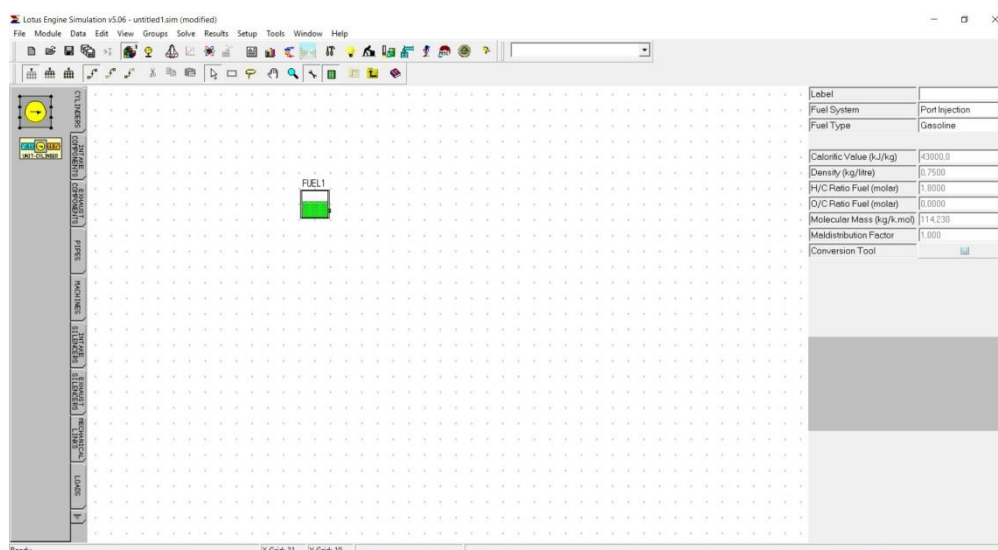
Z karburátoru je směs přiváděna přes ventily do spalovacího prostoru, kde dojde k zažehnutí směsi.

5 MATEMATICKÝ MODEL

Pro tvorbu matematického modelu spalovacího motoru jsem zvolil software Lotus Engine Simulation (dále jen LES) z důvodu příjemného uživatelského prostředí a dostatečné výpočtové přesnosti. Další výhodou je na rozdíl od jiných výpočtových softwarů nabídka více přednastavených hodnot (např. koeficienty tření), což bylo pro mou práci výhodnější, jelikož některá reálná data nebyla dostupná. Alternativou k tomuto softwaru by mohl být program GT Power od společnosti Technologies nebo software Diesel RK vyvinutý na Moskevské státní technické univerzitě.

Software LES je navržený společností Lotus Engineering a jedná se o 1D výpočtový program zaměřující se na výpočet výkonnostních parametrů, spotřeby spalovacích motorů, proudění plynů, tlakových pulzací a dalších. Program se dělí na preprocesor, řešič, postprocesor, optimizér a parametrizér.

Část Preprocesor slouží k zadání vstupních parametrů motorů a jeho komponentů, následně jeho k sestavení na pracovní ploše programu. V pravé části se zobrazuje tabulka, do které lze doplnit parametry jednotlivých částí motoru.



Obr. 18 Pracovní okno softwaru LES

V části Řešič dochází k numerickému výpočtu dějů v motoru, proudění plynu a dalších veličin na základě určených algoritmů a rovnic. Před spuštěním Řešiče je nutné zadat okrajové podmínky, jako jsou například tlak a teplota okolního nasávaného vzduchu, rozsah otáček nebo délka výpočetního kroku. Program postupuje iterační metodou, kdy opakuje výpočet jednotlivých cyklů, dokud nedosáhne konvergence a ustálení vypočtených hodnot.

Část Postprocesor slouží k zobrazení a následné analýze vypočtených výsledků. Výsledky je možné zobrazit v grafické i textové podobě, nebo je možné exportování výsledků do externího programu pro další zpracování. Software LES také nabízí modul Optimizer, který postupně mění parametry, vypočte jednotlivé hodnoty pro tyto stavy a následně je ohodnotí podle vhodnosti. Uživatel zadává maximální a minimální hodnoty, mezi kterými se Optimizer pohybuje a také velikost kroku změny. Podobným modulem je část Parametrizér, ve které se vypočítá nejlepší výsledek bez nutnosti výpočtu všech výpočtových kroků.

5.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Svůj termodynamický model jsem vytvářel na základě motoru popsaného v kapitole 3.2.

5.1.1 VÁLCOVÉ JEDNOTKY

Pro model jsem vytvořil čtyři totožné válcové jednotky se stejnými rozměry lišící se pouze fázovým posunutím. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty pro první válec.

Tabulka 4 Nastavení parametrů pro válcovou jednotku

Vrtání [mm]	84
Zdvih [mm]	61
Zdvihový objem válce [l]	0,3380
Celkový zdvihový objem motoru [l]	1,352
Délka ojnice [mm]	130
Přesazení pístního čepu [mm]	0
Kompresní poměr [-]	10,5:1
Fázové posunutí [°]	0

Druhý válec je od prvního fázově posunutý o 540° , třetí o 180° a čtvrtý o 360° aby byl zajištěn rovnoměrný chod čtyřválcového motoru. Ostatní hodnoty jsem nechal na defaultně přednastavených knihovnách.

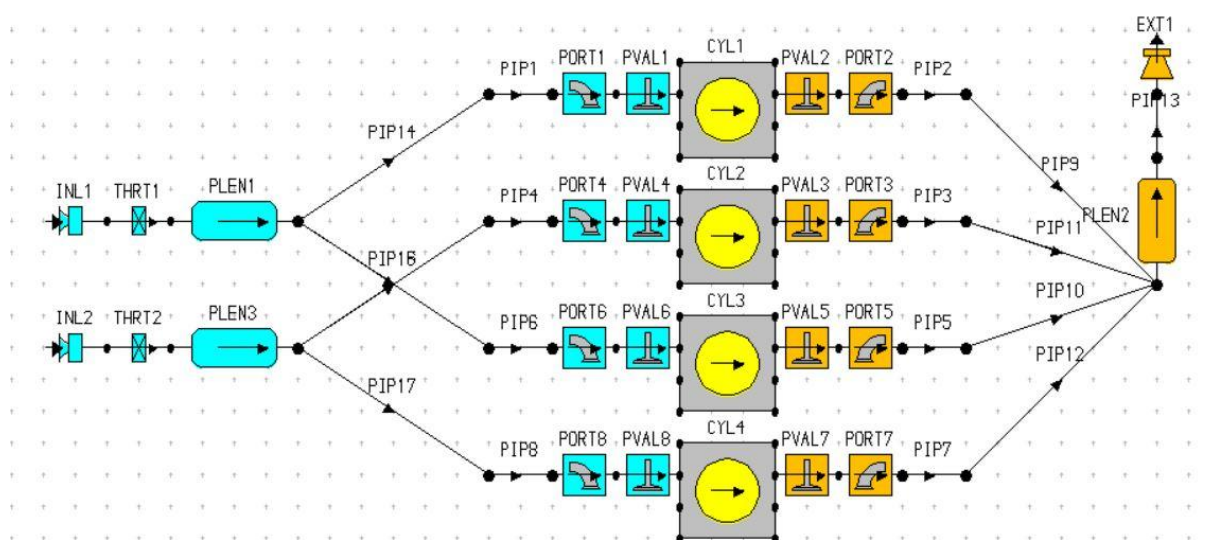
5.1.2 SACÍ A VÝFUKOVÉ POTRUBÍ

Z obrázků motoru je patrné, že každá řada válců má svůj sací trakt se samostatným vstupem, škrticí klapkou a karburátorem, naopak výfukové potrubí je svedeno ze všech válců do jednoho zásobníku.



Obr. 19 Vstup do sacího potrubí motoru Rotax 912 ULS [35][34]

Na základě tohoto zapojení jsem sestavoval i svůj model. Hotový model celého motoru je na následujícím obrázku.



Obr. 20 Schéma matematického modelu v LES

5.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Před výpočtem je nutné zadat okrajové podmínky, v kterých bude motor pracovat. Let letadla se skládá ze tří základních částí: start a vzlet letadla, přímý let v určité nadmořské výšce a přistání. Letadlo se tedy pohybuje v širokém spektru provozních podmínek vyplývajících z letu v různých nadmořských výškách. Nejvíce času letadlo letí v určité nadmořské výšce a tato část má i největší vliv na celkovou spotřebu letadla. Kvůli tomu jsem se při výpočtech a simulacích soustředil právě na tuto část. S nadmořskou výškou se mění vlastnosti vzduchu, z nichž nejdůležitější jsou teplota a tlak, které zásadně ovlivňují výsledný výkon a vytvářené teplo.

Jelikož se v případě uvažovaného letounu většinou jedná o vyhlídková letadla, málokdy překročí piloti hranici 2000 m. n. m. Za letu ve větších nadmořských výškách už může být teplota pod hranicí pohodlného cestování, navíc jednotlivé prvky krajiny se zdají být malé a vzdálené a při malých cestovních rychlostech těchto letadel se výhled mění jen pomalu. Některá letadla s pístovým spalovacím motorem jsou schopna letu ve vyšších výškách, jde však o větší stroje s vyšším výkonem. Ve větších nadmořských výškách je také zapotřebí dbát na nebezpečí nedostatku kyslíku ve vzduchu pro člověka označované jako hypoxie, které nastává při překročení hranice 4000 m. n. m [35].

Pro svůj výpočet jsem zvolil let v nadmořské výšce 1500 m.

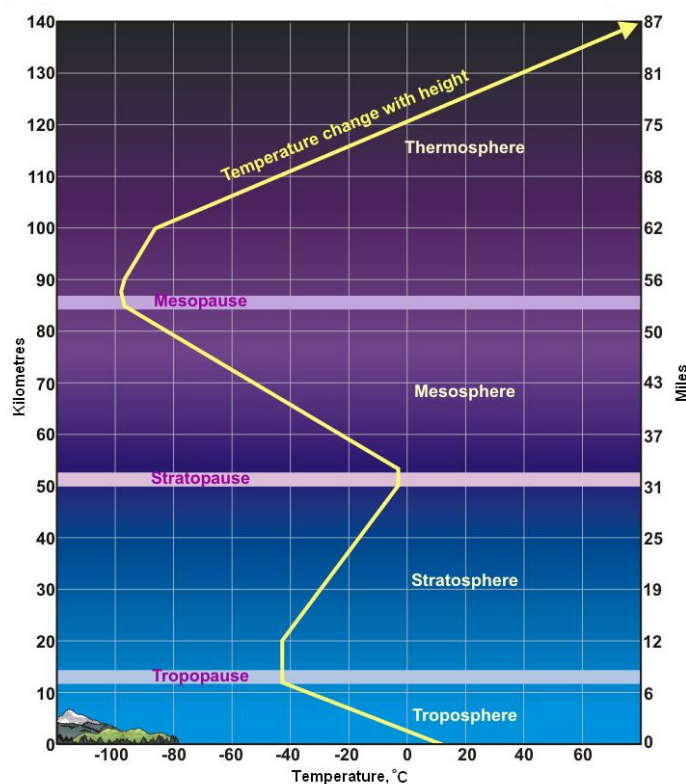
5.2.1 TEPLOTA VZDUCHU

Změna teploty v závislosti na nadmořské výšce lze popsat vertikálním teplotním gradientem. Ten není neměnný, ale závisí na zeměpisné šířce, na denní i roční době, na geologickém podloží a v neposlední řadě na povětrnostních podmínkách. Průměrná hodnota tohoto gradientu je na území střední Evropy 0,65 °C na 100 m. Znamená to tedy, že v průměrných podmínkách klesne teplota o 0,65 °C na každých 100 metrech. Tato hodnota vertikálního teplotního gradientu platí jen pro nižší troposféru, která zahrnuje i let v nadmořské výšce 1500 m [36].

Předpokládáme-li teplotu v 0 m. n. m. 15° C pak teplotu v nadmořské výšce 1500 m. n. m. spočítáme dle vzorce:

$$t = t_0 - h \frac{0,65}{100}, \quad (1)$$

kde t je teplota v nadmořské výšce h a t_0 je teplota v 0 m. n. m. Následným dosazením nám vyjde, že teplota v 1500 m. n. m je 5,25 °C.



Obr. 21 Změna teploty v závislosti na nadmořské výšce [37]

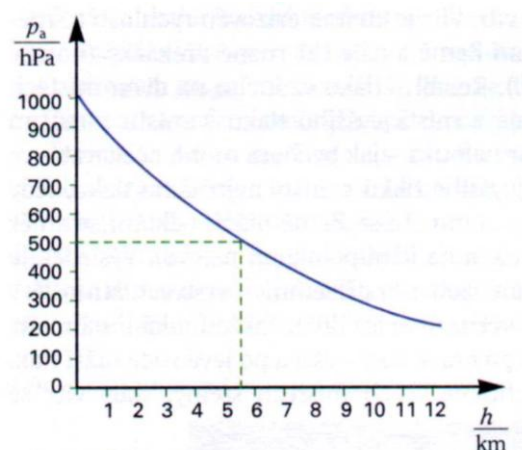
5.2.2 TLAK VZDUCHU

Změna tlaku vzduchu v závislosti na nadmořské výšce je závislá na množství vzduchu, které je nad určitým bodem. Výpočet se liší pro různé vrstvy atmosféry. Tvar vzorce pro nízké výšky a konstantní hodnotu vertikálního teplotního gradientu je následující:

$$p = p_0 * e^{\frac{-\rho * g * h}{p_0}}, \quad (2)$$

kde p je požadovaný tlak v nadmořské výšce h , p_0 je tlak v známé výšce, ρ je hustota vzduchu a g tíhové zrychlení [39][38].

Při uvažování tlaku vzduchu 101325 Pa v 0 m. n. m. vychází tlak v 1500 m. n. m. 86893,6 Pa.



Obr. 22 Závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce [40]

5.2.3 ROZSAH OTÁČEK

Poslední okrajovou podmínkou, kterou je třeba nadefinovat pro spuštění výpočtu, je zadání rozsahu otáček, ve kterém se má výpočet pohybovat a také velikost kroku. Motor se pohybuje v rozsahu od 1000 min^{-1} do 6000 min^{-1} a krok jsem zvolil 500 min^{-1} .

6 PROVOZ NA AVGAS

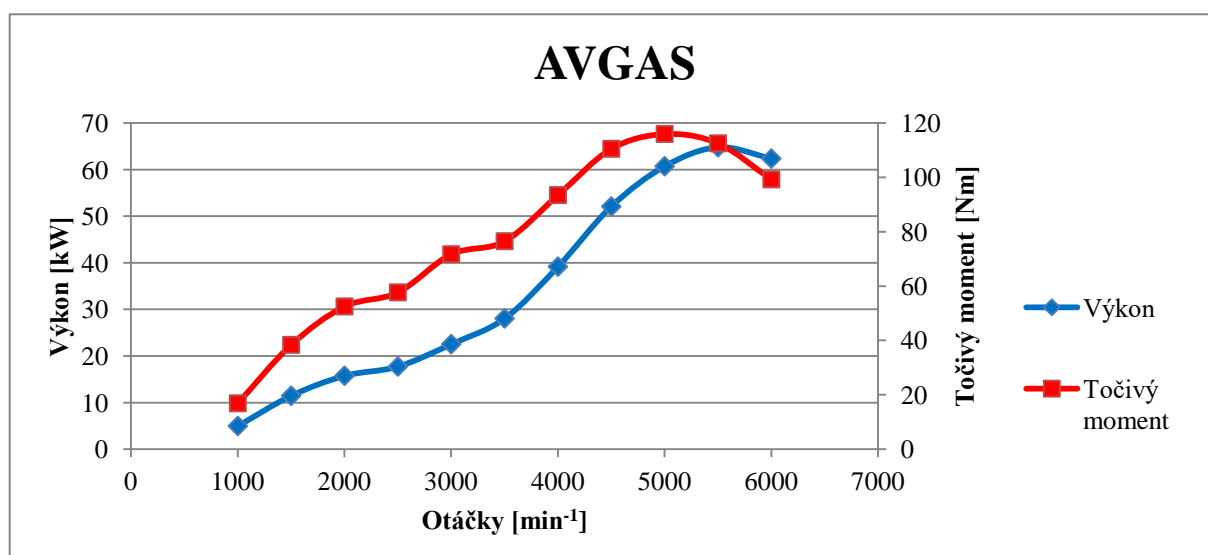
Při uvažování spalování různých paliv je zapotřebí nastavit parametry paliva a způsob tvorby směsi. To nám umožňuje symbol palivové nádrže v pracovním okně softwaru LES. Při kliknutí na něj můžeme v pravé části nastavit parametry paliva a způsob tvorby směsi.

Aby bylo možné posuzovat použití CNG jako letadlového paliva, je třeba nejdříve určit výkonnostní parametry a spotřebu při použití běžného leteckého benzínu AVGAS. Nastavení parametrů palivového systému při uvažování spalování leteckého benzínu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5 Parametry palivového systému při spalování leteckého benzínu

Způsob tvorby směsi	Karburátor
Druh paliva	Benzín
Výhřevnost paliva	44650 kJ/kg
Hustota paliva	0,690 kg/l

Následně má software všechny potřebné parametry a hodnoty pro výpočet. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny na následujících grafech.

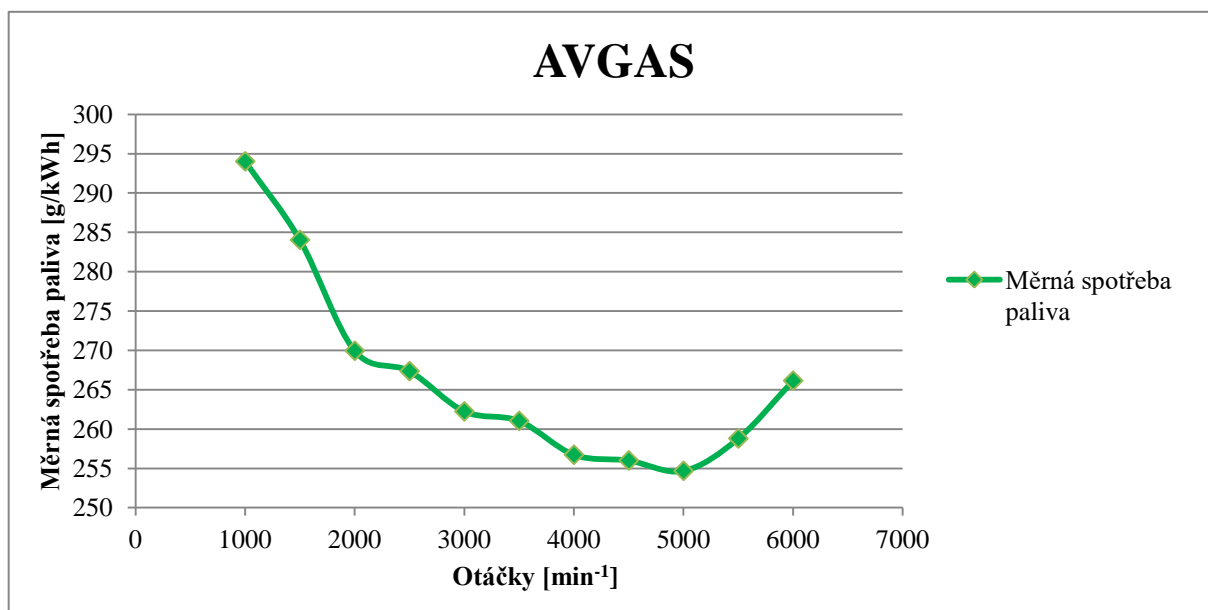


Obr. 23 Výkon a točivý moment v závislosti na otáčkách při spalování leteckého benzínu

Maximálního výkonu 64,89 kW motor dosahuje při 5500 min⁻¹ a maximální točivý moment je 115,9 Nm při 5000 min⁻¹.

Další sledovanou veličinou je měrná spotřeba paliva. Tato veličina nám říká, kolik hmotnostního množství paliva je třeba k vyprodukování jednotky práce. Veličina je nepřímo úměrná účinnosti motoru, neboť čím je měrná spotřeba menší, tím lépe se palivo využije. Nejnižší měrné spotřeby motor dosahuje při maximálním točivém momentu, kdy je hodnota rovna 242,53 g/kWh. Letadlový motor však nepracuje kromě vzletu s maximálním výkonem, ale při přímém letu využívá 60 až 80 % výkonu. Spotřeba paliva pro srovnání je tedy počítána

při 75 % výkonu. V následujícím grafu je vidět průběh měrné spotřeby paliva při spalování leteckého benzínu.



Obr. 24 Měrná spotřeba paliva v závislosti na otáčkách při spalování leteckého benzínu

75 % výkonu (48,58 kW) motor dosahuje přibližně při 4800 min⁻¹. Měrná spotřeba paliva při daných podmínkách činí 255,23 g/kWh.

7 PROVOZ NA CNG

Při konverzi motoru na spalování CNG je třeba uzpůsobit k tomu palivový systém. V následující tabulce jsou shrnuty hlavní rozdíly mezi palivy.

Tabulka 6 Hlavní rozdíly vlastností paliv

	AVGAS	CNG
Výhřevnost [MJ/kg]	44,65	34,1
Hustota [kg/m³]	690	0,69
Oktanové číslo	100	128
Stechiometrický poměr paliva ke vzduchu	14,7	9,5

7.1 CNG SE SMĚŠOVAČEM

Prvním způsobem, jak upravit palivový systém na spalování zemního plynu, je výměna karburátoru za směšovač. Jelikož směšovač je obdoba karburátoru, namontuje se přímo na sací potrubí za vzduchový filtr místo něj. Do směšovače je palivo přiváděno pomocí hadice či potrubí přes regulátor tlaku z tlakové nádrže.

7.1.1 ZACHOVÁNÍ STÁVAJÍCÍCH PARAMETRŮ MOTORU

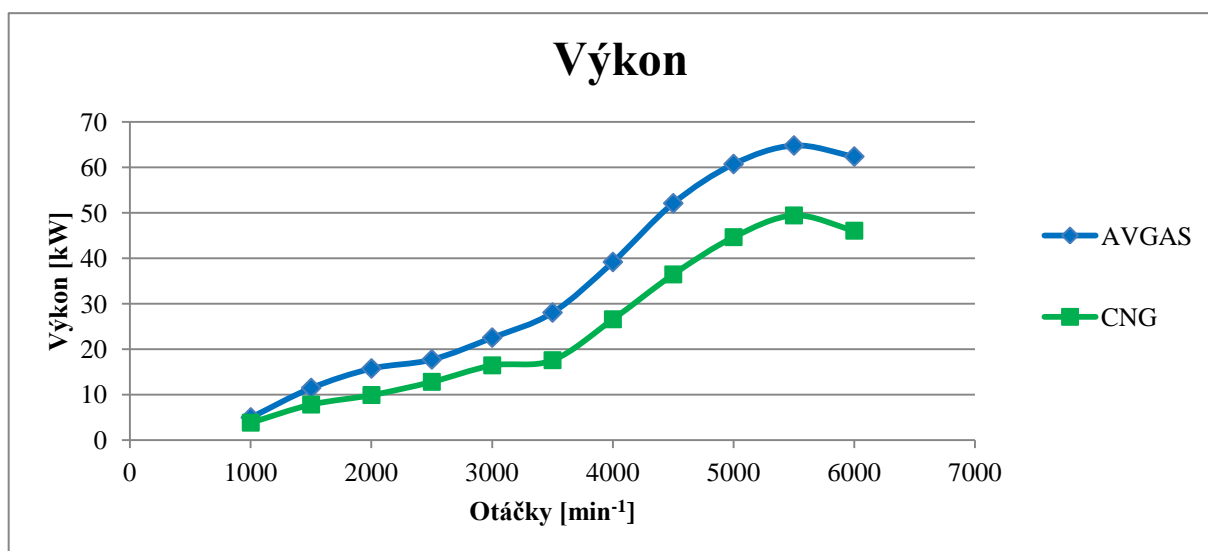
První variantou výpočtu je tedy změna paliva při zachování všech ostatních hodnot motoru. Pro výpočet výkonnostních parametrů je třeba nastavit palivový systém v softwaru LES. Jako druh paliva byl zvolen metan, protože zemní plyn je z většiny tvořen právě jím.

Nastavení parametrů palivového systému při uvažování spalování stlačeného zemního plynu s použitím směšovače jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 7 Parametry palivového systému na CNG se směšovačem

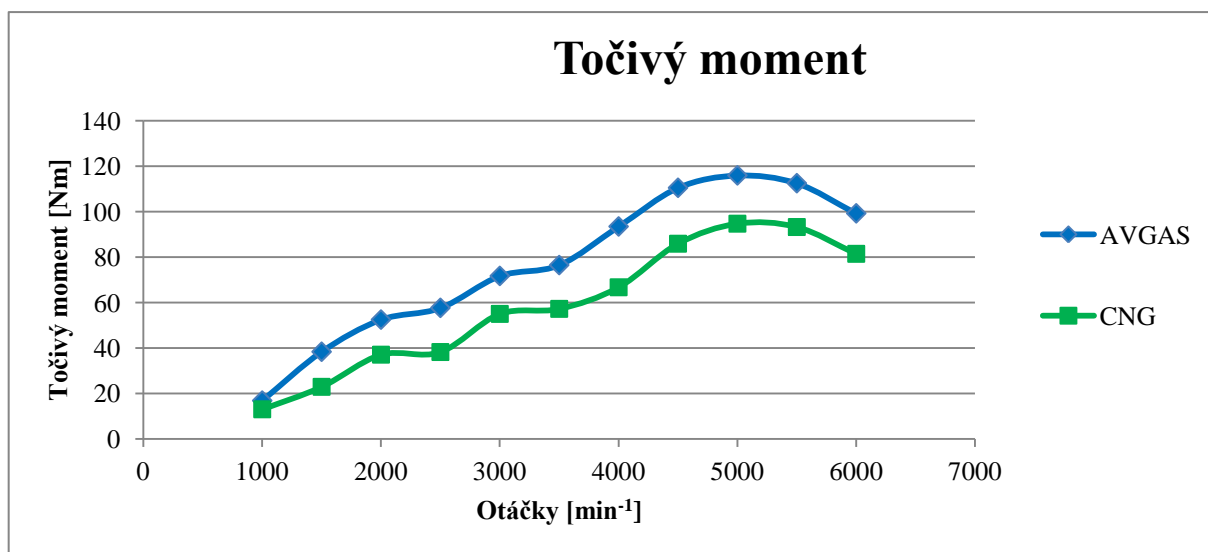
Způsob tvorby směsi	Karburátor
Druh paliva	Metan
Výhřevnost paliva	34100 kJ/kg
Hustota paliva	0,0007 kg/l

V následujícím grafu je zobrazeno srovnání výkonu motoru při spalování leteckého benzínu a CNG.



Obr. 25 Porovnání průběhu výkonu v závislosti na otáčkách

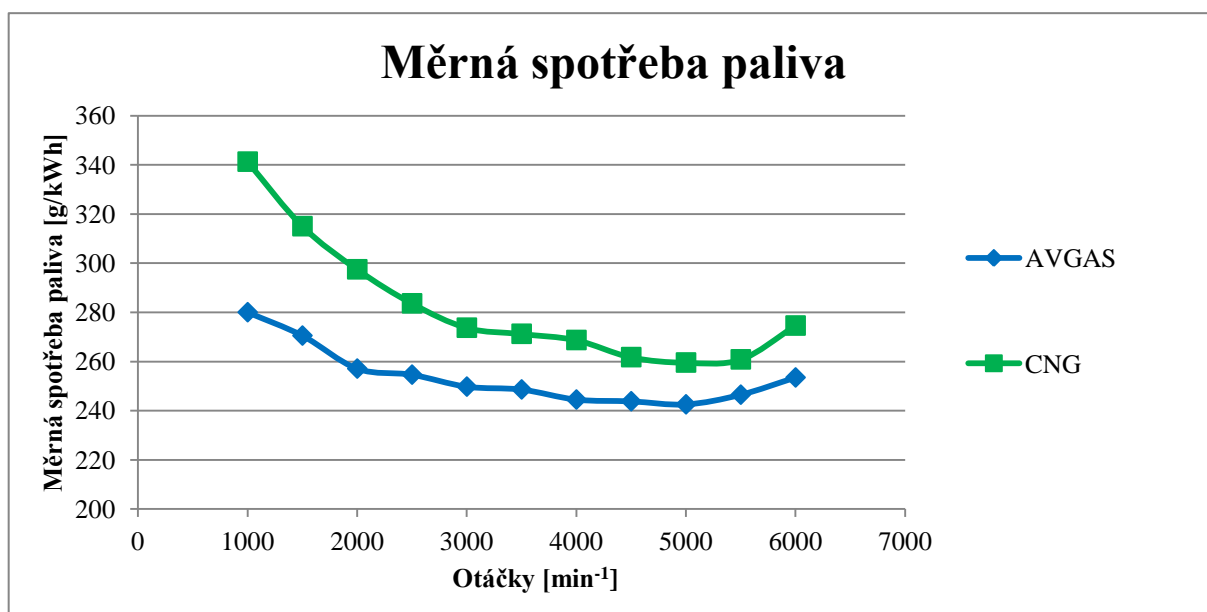
Podle očekávání je výkon motoru spalující zemní plyn nižší než v případě spalování leteckého benzínu. Maximálního výkonu motoru 49,4 kW dosahuje motor při otáčkách 5500 min⁻¹, došlo tedy ke snížení o téměř 25 % oproti palivu AVGAS.



Obr. 26 Porovnání průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách

Stejně tak došlo i k poklesu točivého momentu. Při provozu na CNG je maximální točivý moment 94,69 Nm, tedy nižší o 19 %.

S poklesem výkonových parametrů došlo zároveň k nárůstu měrné spotřeby paliva. Zatímco u paliva AVGAS byla nejnižší měrná spotřeba 242,53 g/kWh, u zemního plynu je nejnižší hodnota 259,53 g/kWh, došlo tedy k nárůstu o 7 %. Srovnání průběhu měrné spotřeby paliva v závislosti na otáčkách je na následujícím grafu.

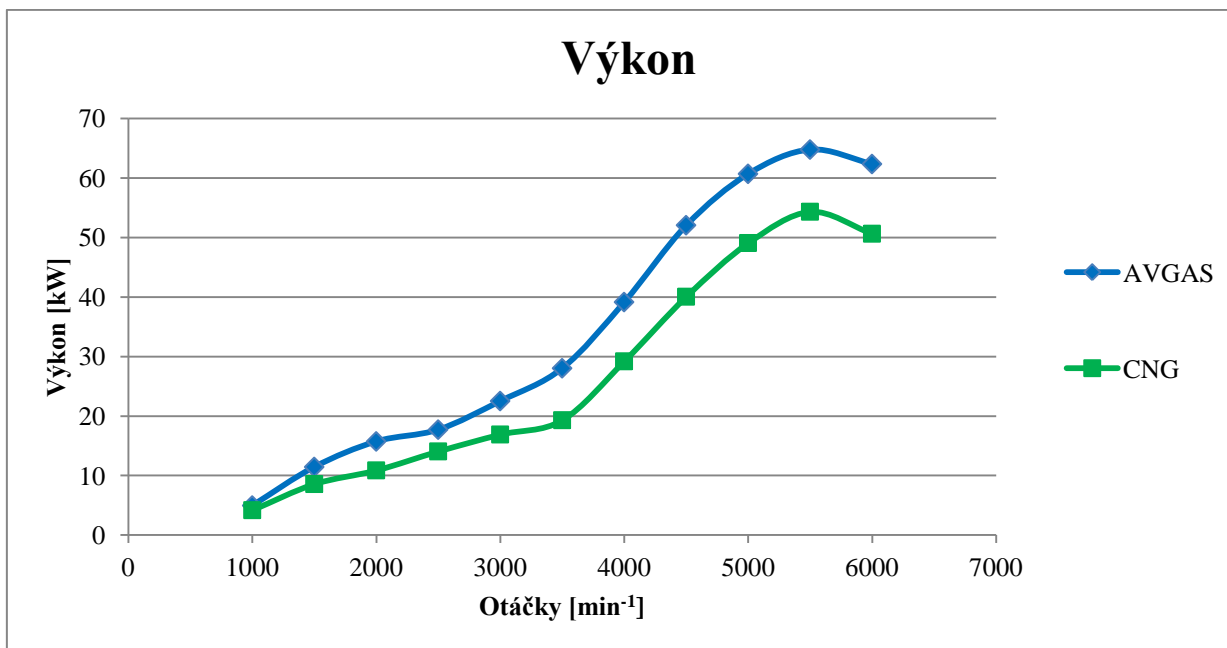


Obr. 27 Porovnání průběhu měrné spotřeby paliva v závislosti na otáčkách

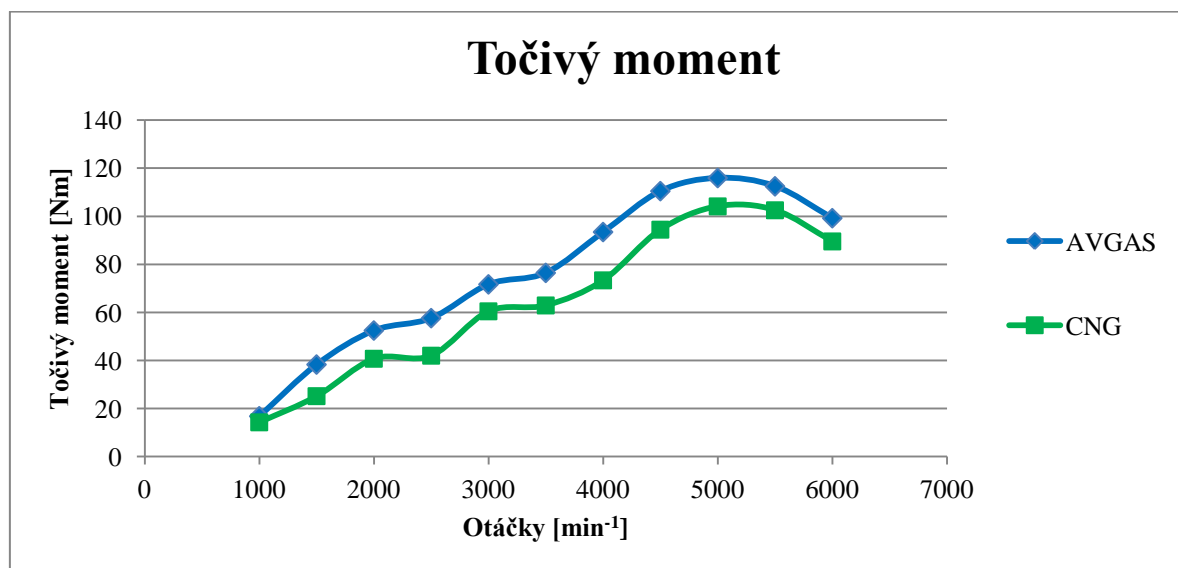
Jelikož je výkon motoru při provozu na CNG a zachování ostatních parametrů značně nižší, budu se snažit motor a palivové potrubí upravit tak, abych se co nejvíce přiblížil hodnotám leteckého benzínu AVGAS.

7.1.2 ZVÝŠENÍ KOMPRESNÍHO POMĚRU

U paliva AVGAS by při vyšším kompresním stupni mohlo nastat, že by vinou vyšší komprese - a zde i úměrně vyšší teploty - došlo k zapálení směsi ve válci dříve, než by směs zažehla jiskra od zapalovací svíčky. Zemní plyn má však oproti leteckému benzínu vyšší oktanové číslo, které mu propůjčuje lepší odolnost proti detonačnímu spalování, proto je možné zvýšit kompresní poměr motoru bez nebezpečí tzv. klepání motoru. Pro další variantu výpočtu tedy zvýším kompresní poměr motoru za účelem vyššího výkonu. V programu LES změním hodnotu kompresního poměru z 10,5:1 na hodnotu 11,5:1. Ostatní parametry zůstávají stejné.

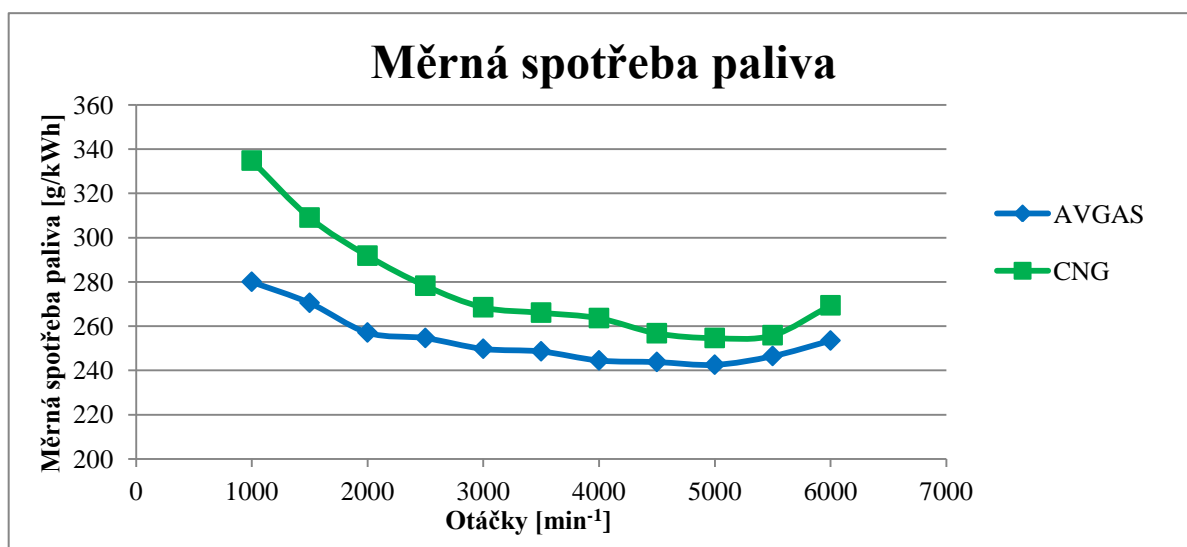


Výkon tak stoupl na hodnotu 54,33 kW při 5500 min⁻¹, oproti palivu AVGAS jde tedy o snížení o 16 %. Zvýšením kompresního poměru jsme tedy získali vyšší maximální výkon o 5 kW při provozu na zemní plyn.



K nárůstu došlo i u točivého momentu z 94,67 Nm na 104,14 Nm. Pokles točivého momentu oproti leteckému benzínu je při těchto podmínkách 10 %.

Díky vyššímu kompresnímu poměru pracuje motor s vyšší účinností, takže dochází ke snížení měrné spotřeby paliva, kdy při maximálním točivém momentu motor vykazuje 254,59 g/kWh.

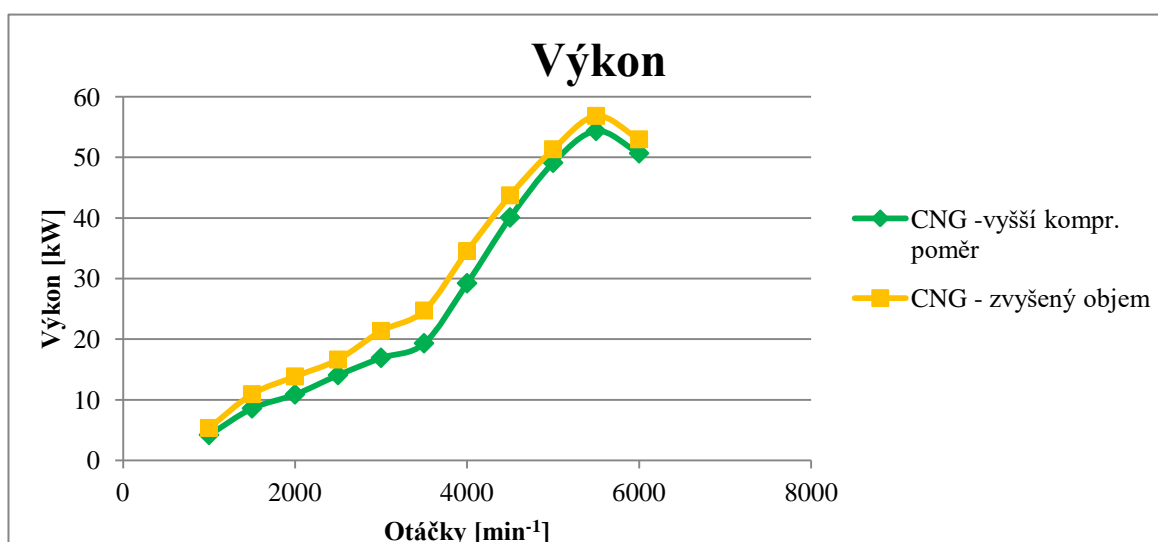


Obr. 28 Porovnání průběhu měrné spotřeby paliva v závislosti na otáčkách

7.1.3 ZVÝŠENÍ OBJEMU MOTORU

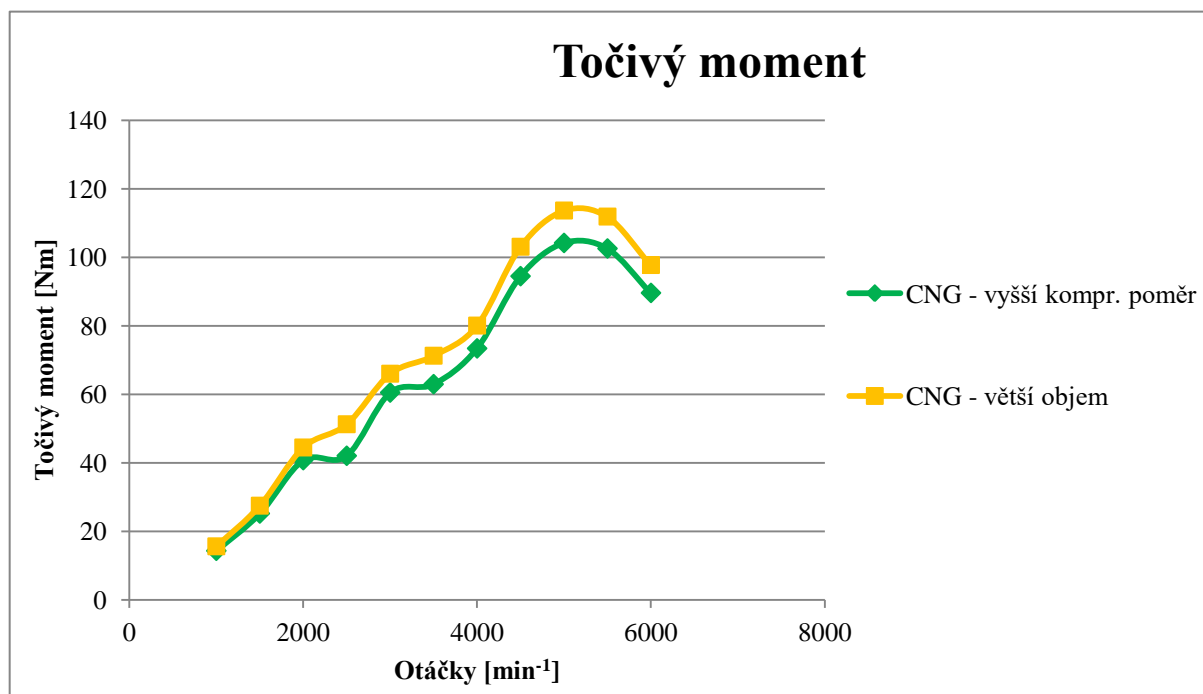
Přestože vyšší kompresní poměr zvýšil výkonnostní parametry a účinnost motoru, stále je deficit výkonu značný. Dalším způsobem, jak tento deficit snížit, je zvětšení zdvihového objemu motoru. Toho nejlépe dosáhnou převrtáním válce. Zvýším tedy průměr válce o 1 mm na konečnou hodnotu 85 mm. Celkový objem čtyřválce se tak změnil na 1384,6 cm³.

Na následujícím grafu je srovnání výkonu před zvětšením válce, tedy pouze s vyšším kompresním poměrem, a po zvětšení.



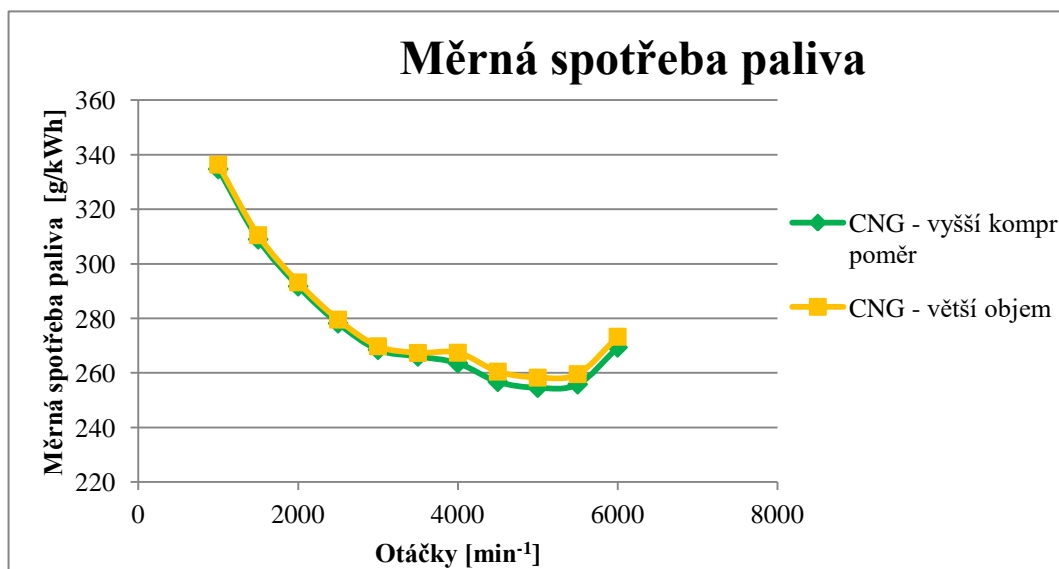
Obr. 29 Porovnání průběhu výkonu v závislosti na otáčkách

Z průběhu výkonu je patrné, že došlo ke zvýšení výkonu především v nízkých a středních otáčkách, naopak ve vyšších otáčkách se výkon zvýšil jen nepatrně. Maximální výkon vzrostl z 54,33 kW na 56,82 kW.



Obr. 31 Porovnání průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách

U točivého momentu došlo k nárůstu v celém rozsahu, především pak ve vysokých otáčkách. Nyní motor dosahuje maximálního točivého momentu 113,60 Nm, což je velmi srovnatelné s točivým momentem generovaným při spalování AVGASu (115,93 Nm).



Obr. 30 Porovnání průběhu měrné spotřeby paliva v závislosti na otáčkách

Měrná spotřeba paliva vzrostla především ve vyšších otáčkách. Zvětšený motor vykazuje minimální měrnou spotřebu 258,29 g/kWh.

7.1.4 SROVNÁNÍ

V následující tabulce je uvedeno srovnání výkonnostních parametrů a spotřeby při provozu na AVGAS a při provozu na CNG se směšovačem.

Tabulka 8 Srovnání výkonnostních parametrů

	Maximální výkon [kW]	Maximální točivý moment [Nm]	Nejnižší měrná spotřeba [g/kWh]	75 % výkonu [kW]	Měrná spotřeba paliva při 75 % výkonu [g/kWh]
AVGAS	64,78	115,93	242,53	48,59	244,12
CNG	49,39	94,67	259,53	37,04	260,89
CNG s vyšším kompr. poměrem	54,33	104,14	254,59	40,75	256,74
CNG s větším objemem	56,82	113,60	258,29	42,60	256,58

Z tabulky je patrné, že při provozu na zemní plyn vykazuje motor menší výkonové parametry. Při využití antidetonačních vlastností plynu a zvýšení kompresního motoru dojde ke zvýšení výkonu a při následném zvětšení vrtání válce lze i přes deficit výkon označit za dostatečný. Důležitým parametrem pro srovnání jsou provozní náklady, které jsou počítány na konci této kapitoly.

7.2 VEFUKOVÁNÍ CNG DO SACÍHO POTRUBÍ

Druhým způsobem tvorby zápalné směsi je vefukování plynu do sacích kanálů. Tato konstrukce je již podstatně složitější, vzhledem k počtu komponentů, které je nutno do uvažovaného motoru přidat. Do sacího potrubí se umístí před každý válec jeden vstřikovač, který bude řízen řídicí jednotkou. Ta ke své činnosti potřebuje mimo jiné snímač otáček, snímač zatížení motoru a také kyslíkový senzor lamda sondu.

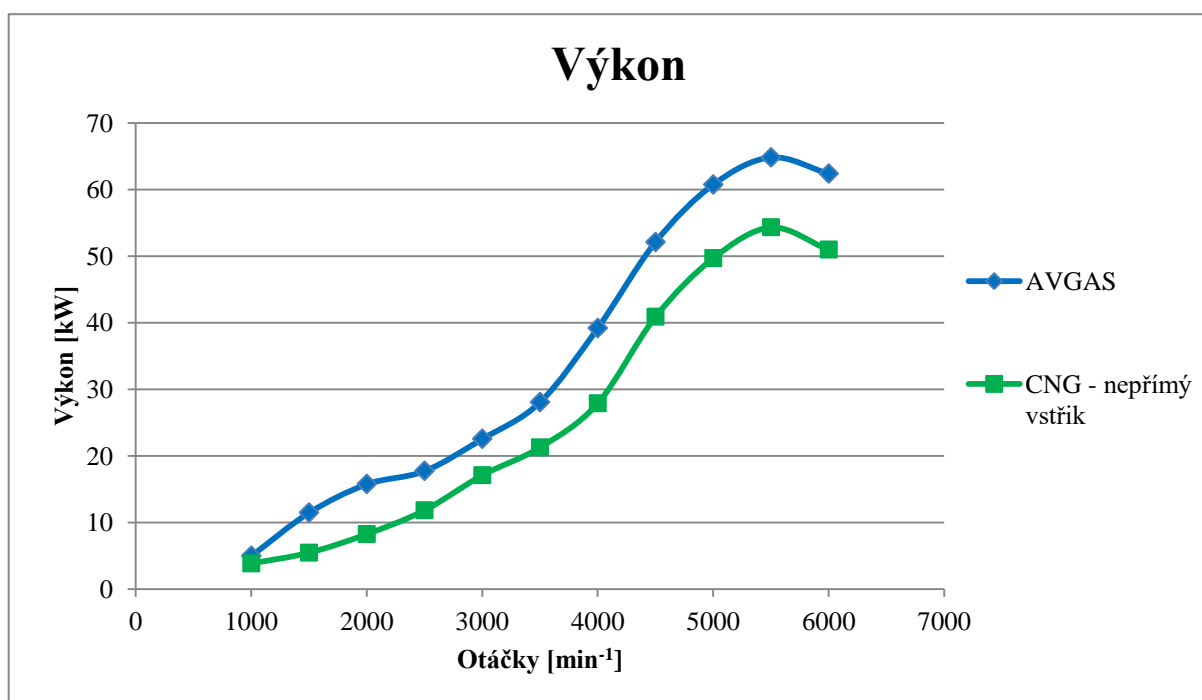
Nastavení parametrů palivového systému v softwaru LES při uvažování spalování stlačeného zemního plynu za pomoci vefukování plynu do sacího potrubí jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 9 Parametry palivového systému s vefukováním CNG do sacího potrubí

Způsob tvorby směsi	Nepřímý vstřík
Druh paliva	Metan
Výhřevnost paliva	34100 kJ/kg
Hustota paliva	0,0007 kg/l

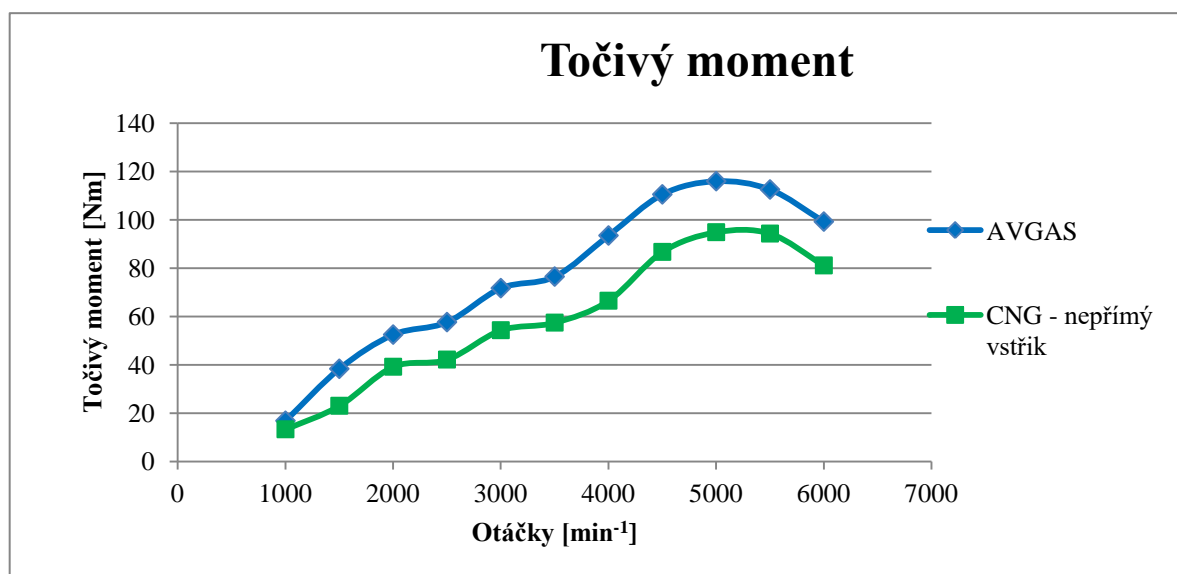
7.2.1 NEPŘÍMÝ VSTŘÍK PŘI ZACHOVÁNÍ STÁVAJÍCÍCH PARAMETRŮ MOTORU

Nejprve jsem porovnával výkonnostní parametry motoru při stejném nastavení jako u spalování leteckého benzínu.



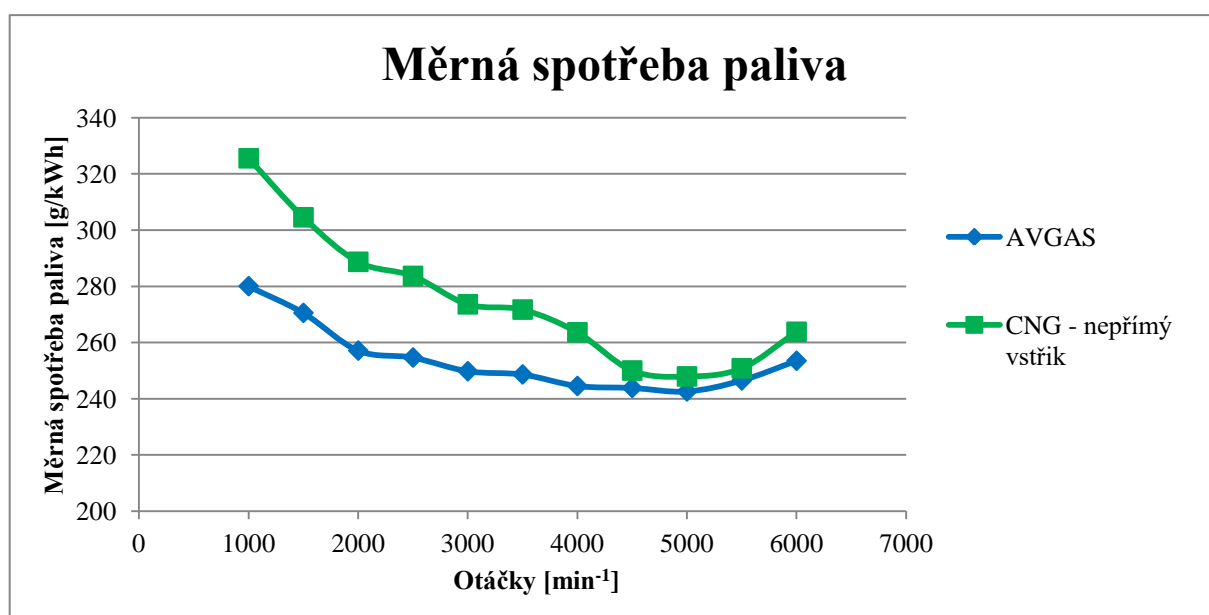
Obr. 32 Porovnání průběhu výkonu v závislosti na otáčkách

V porovnání s leteckým benzínem došlo k poklesu o 16 % na maximální výkon 54,29 kW.



Obr. 33 Porovnání průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách

V případě točivého momentu jde o pokles o 18,5 % na maximální točivý moment 94,26 Nm.

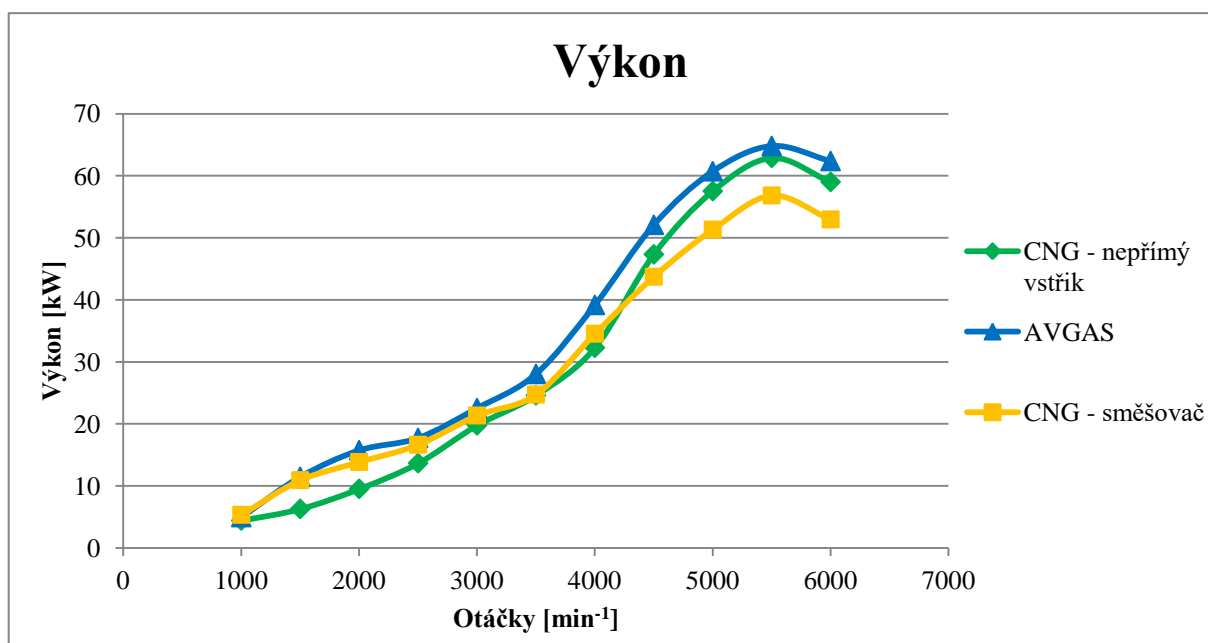


Obr. 34 Porovnání průběhu měrné spotřeby paliva v závislosti na otáčkách

Díky lepšímu řízení množství směsi přiváděné do válce je spotřeba paliva menší než u směšovače. Nejnižší měrná spotřeba při nepřímém vstříku dosahuje 247,86 g/kWh.

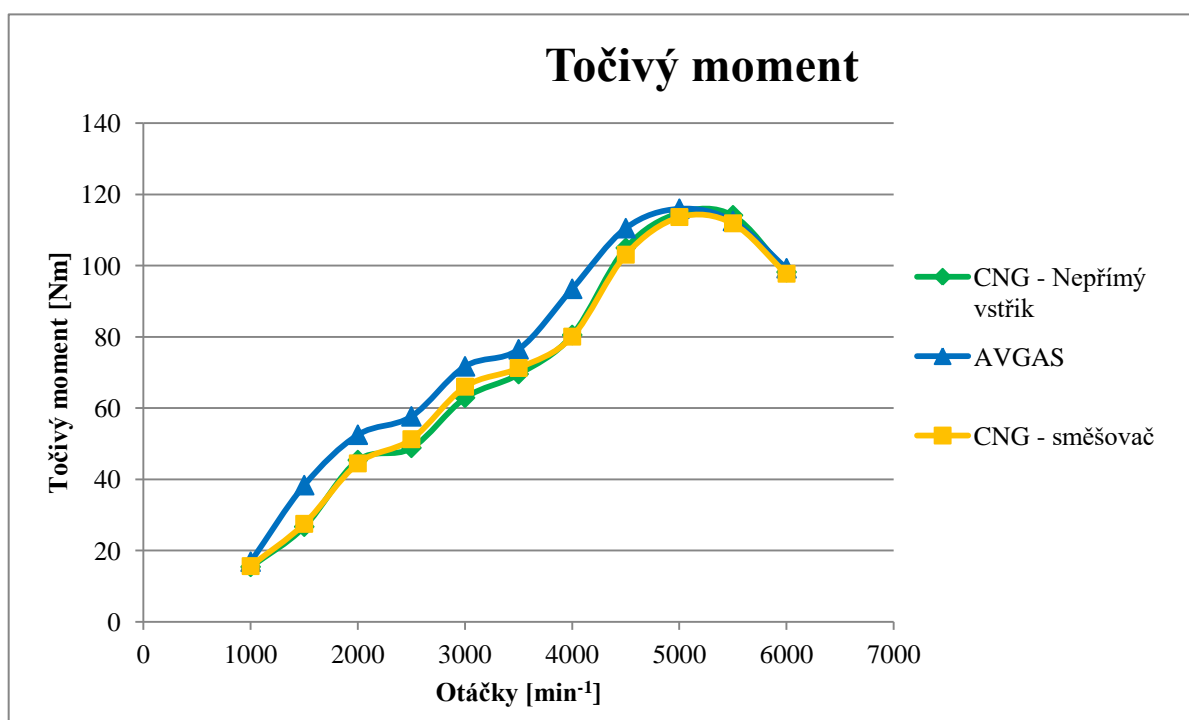
7.2.2 NEPŘÍMÝ VSTŘÍK SE ZMĚNĚNÝM MOTOREM

Pro srovnání jsou další výpočty realizovány při zvýšeném kompresním poměru a větším vrtáním válce.



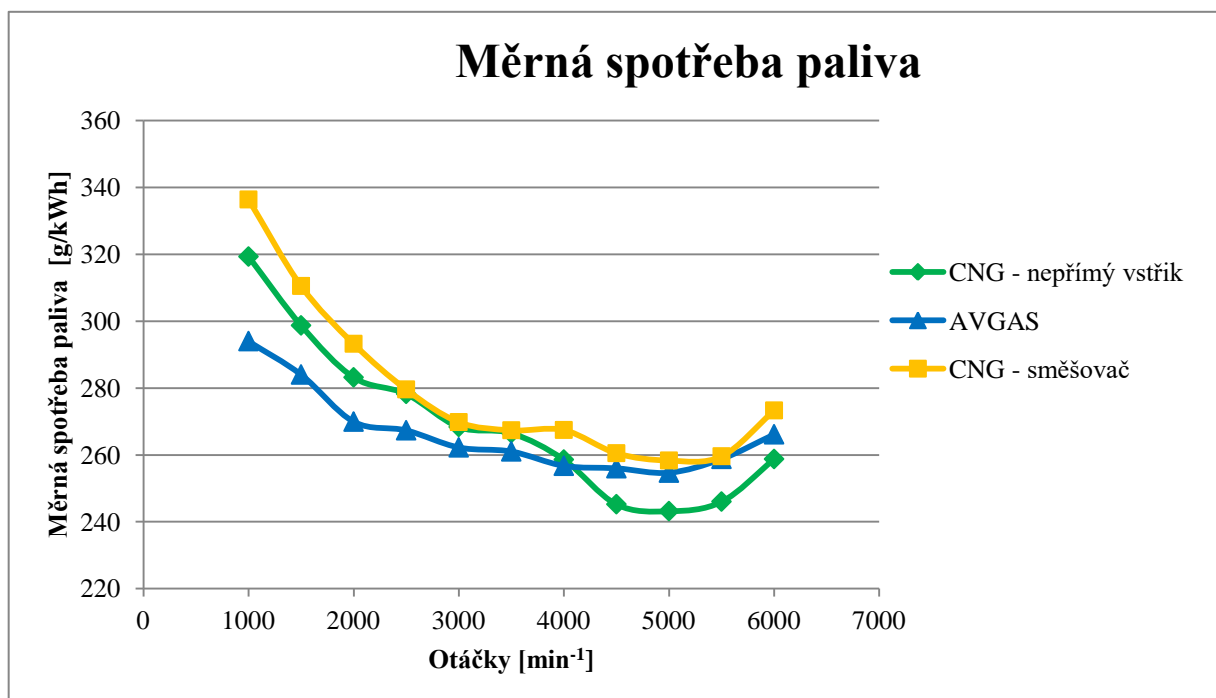
Obr. 35 Porovnání průběhu výkonu všech palivových soustav v závislosti na otáčkách

Z grafu je vidět, že v porovnání se směšovačem má při nepřímém vstřikování motor při nižších otáčkách o několik kilowatt výkon menší, ve středních otáčkách je výkon zhruba srovnatelný, ale ve vyšších otáčkách je výkon vyšší. Motor dosahuje maximálního výkonu 62,87 kW, což je pokles oproti palivu AVGAS jen o 3 %.



Obr. 36 Porovnání průběhu točivého momentu všech palivových soustav v závislosti na otáčkách

Točivý moment je srovnatelný jako při použití směšovače a maximální hodnota 114,80 Nm je velmi blízko maximálnímu točivému momentu při provozu na AVGAS.



Obr. 37 Porovnání průběhu měrné spotřeby paliva všech palivových soustav v závislosti na otáčkách

Díky elektronickému řízení a rovnoměrnějšímu rozdělení směsi do válců je při použití vstřikovačů měrná spotřeba paliva při vyšších otáčkách nižší než při provozu na letecký benzín. Při daných podmínkách vykazuje motor nejnižší spotřebu 243,14 g/kWh.

7.2.3 SROVNÁNÍ

Tabulka 10 Srovnání výkonnostních parametrů a spotřeby

	Maximální výkon [kW]	Maximální točivý moment [Nm]	Nejnižší měrná spotřeba [g/kWh]	75 % výkonu [kW]	Měrná spotřeba paliva při 75 % výkonu [g/kWh]
AVGAS	64,78	115,93	242,53	48,59	244,12
CNG - směšovač	56,80	113,60	258,29	42,60	256,58
CNG - nepřímý vstřik	62,87	114,8	243,14	47,15	245,39

Při uvažování zvýšeného kompresního potrubí a zvětšeného vrtání válců jsou výkonové parametry při vefukování zemního plynu do sacího potrubí srovnatelné s těmi při provozu na

letecký benzín. Spotřeba je také srovnatelná, ale díky rozdílné ceně paliva je provoz na CNG ekonomičtější. Podrobný rozbor provozních nákladů je uveden v následující podkapitole. Způsob tvorby směsi pomocí nepřímého vstřiku je konstrukčně značně složitější a dražší než použití směšovače. Nutno dodat, že důležitou vlastností leteckého motoru je jeho spolehlivost a směšovač je díky své jednoduchosti spolehlivější.

7.3 PROVOZNÍ NÁKLADY

Veličinu, kterou jsem použil pro zhodnocení ekonomičnosti provozu motoru na zemní plyn, je cena hodiny letu. Uvažuji let při 75 % výkonu motoru. Vycházel jsem z měrné spotřeby paliva, ze které jsem si spočítal hodinovou spotřebu paliva a z ní poté cenu hodiny letu. Rovnice pro výpočet hodinové spotřeby:

$$M_{ph} = \frac{m_{pe} * P}{1000} \quad (3)$$

kde m_{pe} je měrná spotřeba paliva a P výkon.

Pro výpočet je třeba znát cenu jednotky paliva. Z přehledu cen leteckého benzínu AVGAS 100LL na českých letištích jsem vypočítal průměrnou cenu za litr benzínu 47,41 Kč [42].

Podobně jsem postupoval i u ceny CNG, kdy průměrná cena se v ČR pohybuje kolem 26,25 Kč za kilogram [41].

V následující tabulce je uvedené srovnání ceny hodiny letu.

Tabulka 11 Srovnání ceny hodiny letu

	75 % výkonu motoru [kW]	Měrná spotřeba paliva při 75 % výkonu [g/kWh]	Hodinová spotřeba [kg/h]	Cena hodiny letu [Kč]
AVGAS	48,59	244,12	11,86 (17,19 l)	814,90
CNG - směšovač	42,60	256,58	10,92	286,90
CNG - nepřímý vstřik	47,15	245,39	11,56	303,52

Z tabulky je patrné že cena hodiny letu při provozu na CNG je téměř třikrát menší než při provozu na letecký benzín. Nižší provozní náklady jsou především při použití směšovače, vykoupeny nižším výkonem.

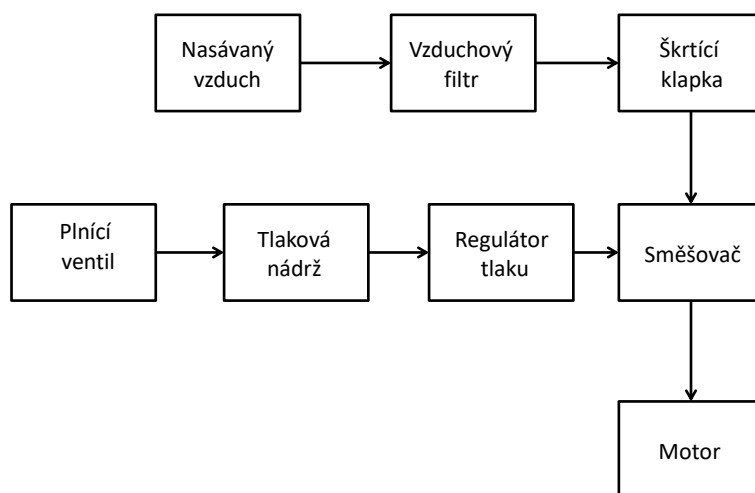
Letecký motor na CNG je výhodný především pro letadla se stálým domovským letištěm, kde bude k dispozici plnička zemního plynu.

8 NÁVRH PALIVOVÉHO SYSTÉMU NA CNG

V následující kapitole bude rozebrán návrh a změny v konstrukci palivového systému na CNG.

8.1 PALIVOVÁ SOUSTAVA SE SMĚŠOVAČEM

Na následujícím obrázku je znázorněno schéma palivové soustavy



Obr. 38 Schéma palivové soustavy na CNG se směšovačem

Součástí palivového systému musí být bezpečnostní a pojistné prvky, neboť soustava musí být několikanásobně jištěna.

8.1.1 PLNICÍ VENTIL

Plnicí ventil slouží k propojení plnicí stanice s nádrží. Pomocí rychloupínacího systému se plnicí pistole na hadici výdejního stojanu připojí na plnicí koncovku. Při plnění nedochází ke ztrátám paliva, ke kterým běžně dochází odparem při tankování kapalných paliv. U zemního plynu také nehrozí kontaminace půdy a spodních vod při havárii na plnicím systému, neboť zemní plyn je lehčí než vzduch a přirozeně odvětrává. U CNG systému je vyloučené zcizení pohonných hmot. Pro zadaný systém by vyhovoval plnicí ventil od firmy Tomasetto [43].



Obr. 39 Plnicí ventil Tomasetto

8.1.2 TLAKOVÁ NÁDRŽ

Zemní plyn je uchováván při tlaku 20 MPa v tlakových válcových nádobách. Tyto nádrže mohou být vyrobeny z ocelových plechů, z hliníku nebo kompozitních materiálů. Ocelové nádrže mají největší hmotnost, ale jsou nelevnější. Nádrže jsou důkladně testovány z hlediska nárazu, požáru a působení vysokého tlaku. Životnost takových nádrží se stanovuje na 20 let.

NÁDRŽ Z OCELOVÝCH PLECHŮ

Při návrhu velikosti nádrže jsem vycházel ze zvoleného letadla Tecnam. Při provozu na AVGAS je letoun schopen přibližně 6,47 hodiny letu. Aby mohl letět stejnou dobu na zemní plyn, spotřeboval by 70,72 kg CNG, tedy přibližně 99 m³. Objem takové nádrže si lze spočítat ze stavové rovnice ideálního plynu. Stavová rovnice určuje vztah mezi jednotlivými stavovými veličinami termodynamického systému. Lze ji vyjádřit ve tvaru:

$$pV = nRT, \quad (4)$$

kde p je tlak plynu, V je jeho objem, n je látkové množství, R je molární plynová konstanta a T je termodynamická teplota. Díky této rovnici si lze spočítat, že nádrž by musela mít objem přes 500 litrů. Hmotnost takové nádrže by tak přesáhla hodnotu 450 kg. Pomineme-li velikost a umístění nádrže na letadlo, pro letadlo vážící 331 kg by šlo o nádrž těžší než letadlo samo. Takové řešení je tedy nereálné.

Pokud zanedbáme hmotnost samotných nádrží na benzín, palivo AVGAS v obou nádržích váží 75,9 kg. Aby tato hmotnost byla srovnatelná s hmotností nádrže na CNG s náplní, její objem by neměl přesáhnout 70 l. Dle nabídky firmy Vítkovice - Milmet a.s. má ocelová válcová nádrž o objemu 70 l průměr 360 mm a délku 900 mm. Nádrž váží 70 kg a je možné v ní uchovávat 13,81 m³ zemního plynu při tlaku 20 MPa, což je 9,87 kg plynu. Při hodinové spotřebě 10,92 kg/hod by však letoun nebyl schopen ani hodiny letu. Systém s ocelovou nádrží tedy není pro letadla této kategorie vhodný [44].



Obr. 40 Ocelová tlaková nádrž [44]

NÁDRŽ Z KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Nádrže z kompozitních materiálů jsou tvořeny plastovou vložkou, které je celá obalena skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Součástí je plynotěsná tlustá gumová membrána. Tento typ nádrže má znatelně nižší hmotnost, ale je také několikanásobně dražší.

Aby letadlo mělo stejný dolet jako na letecký benzín, hmotnost samotné nádrže by v takovém případě byla 133,27 kg s náplní potom 209,17 kg. Pro letoun by šlo o nárůst hmotnosti o 63 %, což u letadla tohoto typu není možné. Při uvažování pouze poloviční doby letu by podle nabídky firmy Vítkovice - Milmet a.s. vyhovovala kevlarová nádrž o objemu 236 l ve které lze uskladnit až 59 m³ CNG. Nádrž samotná váží 80,5 kg, má průměr 394 mm a délku 2460. Problémem ale stále zůstává umístění nádrže, neboť při umístění jedné nádrže pod trup letadla by u takto velkého průměru nádrže muselo dojít ke zvednutí podvozku a zároveň by nádrž měla velký vliv na aerodynamiku letounu. V případě použití dvou menších nádrží o celkové kapacitě 54 m³ CNG by průměr těchto nádrží byl 394 mm a délka 1280 mm. Takto zavěšené nádrže pod křídly by zvyšovaly aerodynamický odpor a snižovaly účinnou plochu křídel [44].



Obr. 41 Tlaková nádrž z kompozitních materiálů [44]

Z výše uvedeného vyplývá, že největším úskalím konverze leteckého motoru na spalování zemního plynu je návrh velikosti nádrže, volba materiálu a její umístění na letounu.

8.1.3 REGULÁTOR TLAKU

Regulátor tlaku redukuje tlak plynu z nádrže na požadovaný pracovní tlak nízkotlaké části soustavy 0,1 až 0,2 MPa. Při expanzi plynu dochází k velkému ochlazení. Teplotu po expanzi plynu si lze spočítat stavovou rovnicí. Pokud uvažujeme teplotu stlačeného zemního plynu stejnou, jako je teplota okolí v nadmořské výšce 1500 m tedy 5,25 °C, pak po expanzi na tlak 0,15 MPa by měl plyn teplotu -273,11 °C. Bod tuhnutí zemního plynu je -182 °C, expanzí by tedy došlo k zamrznutí plynu. Z tohoto důvodu je regulátor napojen na chladicí okruh automobilu, ze kterého odebírá teplo. Pro daný palivový systém jsem vybral regulátor tlaku od firmy Tomasetto, který má integrovaný solenoidní ventil a nastavitelný výstupní tlak 0,1 až 0,2 MPa. Výkon reduktoru je až 300 kW [45].



Obr. 42 Regulátor tlaku CNG Tomasetto [45]

8.1.4 SMĚŠOVAČ

Posledním důležitým komponentem palivového systému na zemní plyn je směšovač. Směšovače se liší především průměrem difuzoru, ale také tvarem výústních kanálků pro přívod plynu. Pro uvažovaný motor jsem vybral směšovač s průměrem 63 mm od firmy LGC s označením GM01. Směšovač je vhodný pro všechny motory s přirozeným sáním a lze ho zakoupit v menších i větších velikostech [49].



Obr. 43 Směšovač LGC GM01 [49]

8.2 VEFUKOVÁNÍ CNG DO SACÍHO POTRUBÍ

Dalším způsobem tvorby směsi u zemního plynu je vícebodové vefukování plynu do sacího potrubí před sací ventily. Tento způsob je konstrukčně značně složitější, neboť vyžaduje elektronickou řídicí jednotku, kyslíkový senzor snímající složení výfukových plynů a v neposlední řadě vstřikovače, které regulují množství vefouknutého plynu délkou otevření trysky.

Plnicí ventil a tlaková nádrž jsou stejné jako u systému se směšovačem.

8.2.1 REGULÁTOR TLAKU

V zásobníku před vstřikovači se udržuje absolutní tlak 500 až 1000 kPa, proto je třeba regulátor tlaku plynu, který je schopen redukovat plyn na vyšší pracovní tlak, než u směšovače. Proto je pro systém s nepřímým vstřikem vhodnější regulátor tlaku, který má vyšší výstupní tlak. Vybral jsem regulátor tlaku od firmy Emer, který má výstupní tlak 800 kPa. Při expanzi plynu dojde k prudkému ochlazení, a proto musí být regulátor napojen na chladicí okruh motoru, aby nedošlo k zamrznutí regulátoru [46].



Obr. 44 Regulátor tlaku Emer [46]

8.2.2 VSTŘIKOVAČE

Pro uvažovaný motor jsem vybral vstřikovače Bosch NGI2, které se umístí do sacích kanálů před sací ventily. Jedná se o vstřikovač vhodný jak pro motory přepínávané, tak i motory s přirozeným sáním. Jeden vstřikovač má hmotnost 25 gramů a je schopen průtoku 8,65 kg plynu za hodinu. Vstřikovač dostává signál od řídicí jednotky a je ovládán solenoidem. Před vstřikovačem je umístěn zásobník, ve kterém se udržuje absolutní tlak 500 až 1000 kPa. K řízení směsi jsou nutné elektronické řídicí jednotky s lambda sondou, čidla tlaku, podtlaku a teploty a v poslední řadě kabeláž [48].



Obr. 45 Vstřikovač Bosch NGI2 [48]

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout koncepci hnacího ústrojí pro letadla spalujícího jako palivo CNG. Pro simulace a výpočty byl použit matematický model motoru v programu Lotus Engineering Simulation, následné srovnání výkonnostních parametrů při použití jednotlivých paliv. Na základě těchto simulací byly navrženy úpravy motoru aby byl plně využit potenciál zemního plynu. V neposlední řadě byl navržen palivový systém pro CNG včetně výběru komponent.

V první části diplomové práce je provedena rešerše leteckých motorů a jejich paliv včetně odlišností od motorů automobilních. V další části jsou rozebrány vlastnosti zemního plynu a konstrukce palivového systému pro CNG včetně rozdílů proti konvenční palivové soustavě na benzín.

Druhá část popisuje letadlo a motor, ze kterých simulace a výpočty vycházejí, včetně popisu stávající palivové soustavy na letecký benzín. Následně byl vytvořen matematický model zvoleného motoru v programu Lotus Engineering Simulation, ve kterém probíhaly výpočty a simulace.

Třetí část se zaměřuje na výkonnostní parametry a spotřebu při použití jednotlivých paliv. Nejprve byly vypočteny parametry pro konvenční letecký benzín AVGAS, aby bylo možné paliva porovnat. Následně došlo k přepnutí paliva na zemní plyn se směšovačem a byl zjištěn pokles výkonu motoru. Proto došlo k úpravám motoru za účelem zvýšení výkonu a točivého momentu.

První variantou bylo zvýšení kompresního poměru, aby se plně využil potenciál zemního plynu. Přestože došlo k nárůstu výkonu, deficit byl stále značný. Další modifikací bylo zvětšení zdvihového objemu motoru převrtáním válce. Větší vrtání o 1 mm zajistilo srovnatelný točivý moment, ale nižší výkon o 12 % ve srovnání s leteckým benzinem AVGAS. Následně je provedena simulace pro palivovou soustavu s vícebodovým vstříkáváním. Motor s úpravami při vefukování zemního plynu do sacího potrubí vykazuje srovnatelný výkon a spotřebu jako při provozu na letecký benzín. Na konci této části je srovnání provozních nákladů vztažených na cenu hodiny letu. Při současných cenách zemního plynu je cena hodiny letu až třikrát levnější než hodina letu na AVGAS.

V poslední části je předložen návrh palivové soustavy pro CNG včetně výběru jednotlivých komponent. Největší úskalí přestavby letadla na spalování zemního plynu spočívá v návrhu velikosti a umístění tlakové nádrže. Aby byl dolet uvažovaného letadla srovnatelný s provozem na AVGAS, musela by mít nádrž hmotnost přesahující váhu letadla samotného.

Přestože se CNG jeví jako perspektivní alternativní palivo, jeho využití především v letecké dopravě má určitá úskalí. Výhody provozu na CNG jsou nižší emise, nižší provozní náklady a vyšší životnost motoru. Takové vlastnosti by byly vhodné především pro letecké školy a výcvik nových pilotů. Použití CNG jako leteckého paliva je však limitováno velikostí a umístěním tlakových nádrží na zemní plyn. Nádrže musí mít válcový tvar, není možné je integrovat do křidel letadla a tím zvyšují aerodynamický odpor letounu. Především levnější ocelové nádrže mající velkou hmotnost nejsou vhodné do malých sportovních letadel, u kterých je limitována maximální vzletová hmotnost. Při použití moderních kompozitních materiálů je možné snížit hmotnost těchto nádrží, jedná se ale o velmi drahé řešení. Plnění těchto nádrží může být realizováno pomocí pomaluplnící "domácí" plnící stanice, kde je však

dlouhá doba plnění a je nutné počítat s velkou vstupní investicí nebo může být nádrž z letadla odnímatelná a plnění je tak možné u kterékoliv plnicí stanice. Zajímavým kompromisem se zdá být prototyp letadla na CNG, které je vybaveno standardními nádržemi na letecký benzín v křídlech, ale navíc je pod trupem umístěna menší nádrž na CNG. Letadlo je tedy schopno spalovat obě paliva. Tím se zvyšuje možný dolet letadla a při provozu na CNG jsou provozní náklady mnohem nižší.

Vyvstává otázka, zdali by nebylo možné u malých letadel s pístovým spalovacím motorem využít některá jiná, např. alkoholová alternativní paliva.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. 516 s. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [2] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.
- [3] *Teorie leteckých motorů: Typy leteckých motorů* [online]. 2002 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/teorie/typy-leteckych-motoru/>
- [4] *Dvořák sekačky pily: Dvoutaktní nebo čtyřtaktní motor? Jaký je jejich rozdíl? Jaké mají výhody?* [online]. [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://www.sekacky-pily.cz/dvoutaktni-nebo-ctyrtaktni-motor-jaky-je-jejich-rozdil-jake-maji-vyhody/n66/>
- [5] *Wikipedie: Proudový motor* [online]. 15.4.2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Proudov%C3%BD_motor
- [6] *Oiltanking: Aviation Fuels: Jet Fuel, Aviation Gasoline (AVGAS, Jet B, Biokerosene* [online]. 2019 [cit. 2019-3-11]. Dostupné z: <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/details/term/aviation-fuels.html>
- [7] *Auto.cz: Automobilové kontra letecké palivo: V čem se liší a co když letecké palivo natankujeme do auta?* [online]. 1. 8. 2017 [cit. 2019-3-15]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/automobilove-kontra-letecke-palivo-v-cem-se-lisi-a-co-kdyz-letecke-palivo-natankujeme-do-auta-108824>
- [8] *Flickr: New Radial Engine* [online]. 26. 11. 2010 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/nxtrfoto/6159352705/>
- [9] *Quora: What's the difference between an automotive piston engine and an aircraft piston engine?* [online]. 14. 11. 2017 [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Whats-the-difference-between-an-automotive-piston-engine-and-an-aircraft-piston-engine>
- [10] *Aviation: What are some of the differences between piston engines used in aircraft and automobiles?* [online]. 25. 2. 2015 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/11527/what-are-some-of-the-differences-between-piston-engines-used-in-aircraft-and-aut>
- [11] *Home Built Aircraft Info: Cooling Aircraft Engines* [online]. 2014 [cit. 2019-04-8]. Dostupné z: <https://www.experimentalaircraft.info/articles/aircraft-engines-cooling.php>
- [12] *Aeronautics Guide: Aircraft Engine Cooling Systems* [online]. 2014 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/04/engine-cooling-systems.html>
- [13] *Flight Learnings: Engine Cooling Systems* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.flightlearnings.com/2010/03/07/engine-cooling-systems/>
- [14] *Limbach: Engines 15 kW - 40 kW* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://limflug.de/en/products/engines-15kw-40kw.php>

- [15] *Wikipedie: Dual Ignition* [online]. 13. 1. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dual_ignition
- [16] *CNG 4 You: Vlastnosti zemního plynu* [online]. 16. 4. 2019 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/cng-info/co-je-zemni-plyn.html>
- [17] *CNG +: Definice* [online]. 2019 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/o-cng/definice.html>
- [18] *Nazeleno: CNG: Kolik stojí přestavba vozu? Vyplatí se?* [online]. 13. 3. 2012 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/technologie-1/lpg-a-cng/cng-kolik-stoji-prestavba-vozu-vyplati-se.aspx>
- [19] *EON: Jak nákladná je přestavba na CNG?* [online]. 10. 10. 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/jak-nakladna-je-prestavba-na-cng>
- [20] *Elpigas: Přestavba na NA CNG* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://elpigas.cz/pro-zakazniky/prestavba-na-cng>
- [21] NOVOSÁD, J. Alternativní pohon automobilů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- [22] *Hybrid: Mýty a fakta o CNG: 10 nejčastějších omylů* [online]. 3. 6. 2013 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/myty-fakta-o-cng-10-nejcastejsich-omylu>
- [23] *AutoGas Centrum: Nádrže na LPG a CNG a jejich výměna* [online]. 3. 6. 2013 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.lpg-autogascentrum.cz/nadrze-lpg-a-vymena/>
- [24] *Alibaba: Single system kit lpg cng mixer for fuel system* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Single-system-kit-lpg-cng-mixer_60332981010.html
- [25] *LuckyGas: Vstřikovače LPG/CNG* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.luckygas.cz/category/lpg_cng-komponenty/vstrikovace-lpg_cng-/64
- [26] *Gazeo: A CNG aircraft?* [online]. 31.01.2014 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://gazeo.com/automotive/vehicles/A-CNG-aircraft,article,7470.html>
- [27] *Wikipedie: Tecnam P2002 Sierra* [online]. 11. 5. 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tecnam_P2002_Sierra
- [28] *Tecnam: P2002 JF* [online]. 3. 12. 2014 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.tecnam.com/aircraft/p2002-jf/>
- [29] *Teveso: Rotax 912 ULS* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://teveso.cz/motory/ctyrtaktni-necertifikovane/rotax-912-uls>
- [30] *Aircraft Spruce: CESSNA FUEL VALVES* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.aircraftspruce.com/catalog/appages/cessnafuelvalve.php>

- [31] *Aeronautics Guide: Aircraft Fuel Systems* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/eachmanufacturer-designs-its-own-fuel.html>
- [32] *Essential pilot: Draining the fuel tanks – What to do if you find water?* [online]. 17. 5. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://essentialpilot.co.za/2019/05/17/draining-the-fuel-tanks-what-to-do-when-you-find-water/>
- [33] *Motorkáři: Technika motocyklu - 9. část - tvorba směsi* [online]. 20. 2. 2006 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/technika-motocyklu-9.-cast-tvorba-smesi-3479.html?kid=977>
- [34] *Aircraft Engine: Rotax 912 ULS* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.aircraftengine.cz/Wiener_Neustadt/slides/Rotax%20912%20ULS%20\(6\).html](http://www.aircraftengine.cz/Wiener_Neustadt/slides/Rotax%20912%20ULS%20(6).html)
- [35] *Quora: On average, how high do small aircraft and helicopters fly when they go for a pleasure flight?* [online]. 28. 6. 2017 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.quora.com/On-average-how-high-do-small-aircraft-and-helicopters-fly-when-they-go-for-a-pleasure-flight>
- [36] *Treking: Změna teploty vzduchu v závislosti na nadmořské výšce* [online]. 23. 1. 2018 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.treking.cz/pocasi/zmena-teploty-s-vyskou.htm>
- [37] *Brainly* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://brainly.com/question/11585846>
- [38] *Poradte: Výpočet tlaku vůči nadmořské výšce* [online]. 14. 9. 2015 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.poradte.cz/skola/8542-vypocet-tlaku-vuci-nadmorske-vysce.html>
- [39] *Treking: Atmosférický tlak podle nadmořské výšky, závislost tlaku na výšce* [online]. 13. 2. 2014 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.treking.cz/pocasi/atmosfericky-tlak.htm>
- [40] *Artemis: Tlak vzduchu* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/MMi/meteo1/diplomka/Ramec2_soubory/AAA/tlak1.html
- [41] *CNG: Ceny CNG* [online]. 25. 3. 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.cng.cz/ceny>
- [42] *Aeroweb: Přehled cen leteckého paliva na letištích v ČR* [online]. 13. 7. 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/1785-prehled-cen-leteckeho-paliva-na-letistich-v-cr>
- [43] *JKprodukt: Plnicí ventil CNG Tomasetto* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://eshop.jkproduct.cz/e-shop/1994-plnici-ventil-cng-tomasetto>
- [44] *Fedor Auto: Nádrže CNG* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.fedorauto.cz/nadrze-cng.html>
- [45] *Tomasetto Achille: CNG Reducers Model AT04* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.tomasetto.com/en/products/cng-reducers/model-at04>

- [46] *CNG: NA JAKÉM PRINCIPU JEZDÍ VOZIDLA NA ZEMNÍ PLYN?* [online]. 2018 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://cng.ppas.cz/nejcastejsi-dotazy/na-jakem-principu-jezdi-vozidla-na-zemni-plyn>
- [47] *Fedor: Reduktor Emer CNG* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.fedorauto.cz/eshop.php?id=286>
- [48] *Bosch: Injectors for CNG systems* [online]. 2018 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/compressed-natural-gas/injector-for-cng-systems/>
- [49] *LGC: Venturi Air-Gas Mixer* [online]. 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.lgc.hk/Products1025.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

g	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	Tíhové zrychlení
h	$[\text{m}]$	Nadmořská výška
m_{pe}	$[\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{hod}^{-1}]$	Měrná efektivní spotřeba
M_{ph}	$[\text{kg}\cdot\text{hod}^{-1}]$	Hodinová spotřeba
n	$[\text{mol}]$	Látkové množství
p	$[\text{Pa}]$	Tlak
P	$[\text{kW}]$	Výkon
P	$[\text{kW}]$	Výkon
p_0	$[-]$	Tlak v 0 m. n. m.
R	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$	Molární plynová konstanta
t	$[\text{°C}]$	Teplota
T	$[\text{K}]$	Termodynamická teplota
t_0	$[\text{°C}]$	Teplota v 0 m. n. m.
V	$[\text{m}^3]$	Objem
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota vzduchu